

## TITLE OF THE INVENTION

空間像計測方法及び装置、光学特性計測方法及び装置、投影光学系の調整方法、露光方法及び装置、露光装置の製造方法、並びにデバイス製造方法

## BACKGROUND OF THE INVENTION

## Field of The Invention

本発明は、空間像計測方法及び装置、光学特性計測方法及び装置、投影光学系の調整方法、露光方法及び装置、露光装置の製造方法、並びにデバイス製造方法に係り、更に詳しくは、投影光学系により像面に形成される空間像を計測する空間像計測方法及び空間像計測装置、前記空間像計測方法を利用して投影光学系の光学特性を計測する光学特性計測方法及び光学特性計測装置、前記光学特性計測方法によって計測された光学特性の計測結果に基づいて投影光学系を調整する調整方法、前記空間像計測装置を備える露光装置及び前記調整方法によって光学特性が調整された投影光学系を用いる露光方法、前記光学特性計測方法により投影光学系の光学特性を計測する工程を含む露光装置の製造方法、並びに前記露光装置を用いるデバイス製造方法に関する。

## Description of The Related Art

従来より、半導体素子又は液晶表示素子等をフォトリソグラフィ工程で製造する際に、フォトマスク又はレチクル（以下、「レチクル」と総称する）のパターンを、投影光学系を介して表面にフォトレジスト等の感光剤が塗布されたウエハ又はガラスプレート等の基板上に転写する投影露光装置、例えばステップ・アンド・リピート方式の縮小投影露光装置（いわゆるステッパ）や、ステップ・アンド・スキャン方式の走査型投影露光装置（いわゆるスキャニング・ステッパ）等が用いられている。

ところで、半導体素子等を製造する場合には、異なる回路パターンを基板上

に幾層にも積み重ねて形成する必要があるため、回路パターンが描画されたレチクルと、基板上の各ショット領域に既に形成されたパターンとを正確に重ね合わせることが重要である。かかる重ね合せを精度良く行うためには、投影光学系の結像特性が所望の状態に調整されることが必要不可欠である。

この投影光学系の結像特性の調整の前提として、結像特性を正確に計測する必要がある。この結像特性の計測方法として、所定の計測用マーク（マークパターン）が形成された計測用レチクルを用いて露光を行い、計測用マークの投影像が転写形成された基板を現像して得られるレジスト像を計測した計測結果に基づいて結像特性を算出する方法（以下、「焼き付け法」と呼ぶ）が、主として用いられている。この他、実際に露光を行うことなく、計測用レチクルを照明光により照明し投影光学系によって形成された計測用マークの空間像（投影像）を計測し、この計測結果に基づいて結像特性を算出する方法（以下、「空間像計測法」と呼ぶ）も行われている。

従来の空間像計測は、概ね次のようにして行われていた。すなわち、例えば図45Aに示されるように、正方形開口122が形成された開口板123を基板ステージ上に設置し、不図示の投影光学系によって形成された計測用レチクル上の計測用マークの空間像MP'に対して、基板ステージを介して開口板123を矢印Aの方向に走査し、開口122を透過した照明光を光電変換素子によって受光して光電変換する。この光電変換により、図45Bに示されるような光電変換信号（空間像に対応する光強度信号）が得られる。次に、この図45Bに示されるような光電変換信号の波形を走査方向に対して微分することで図45Cに示されるような微分波形を求める。そして、この図45Cに示されるような微分波形に基づいてフーリエ変換法などの公知の所定の信号処理を施し、計測用マークが投影された光学像（空間像）を求める。

かかる空間像の計測及びこれに基づく投影光学系のディストーション等の検出については、例えば、特開平10-209031号公報等などに詳細に開示

されている。

しかしながら、上記従来の空間像計測方法にあつては、大きな開口を走査させて空間像強度を計測していたことから、図 4 5 B に示されるように、空間像のプロファイルを特徴付ける空間周波数成分以外に大きな低周波成分が混在する結果となつてしまつていた。この一方、光電変換素子の後段に設けられる信号処理系のダイナミックレンジには限りがあり、また、信号処理系のダイナミックレンジに対する分解能（例えば、現状では 16 ビット程度）が限られていることから、結果的に、空間像のプロファイルを反映した信号成分の  $S/N$  比が小さくならざるを得なかつた。このため、ノイズに弱く、空間像から空間像強度信号に変換する際に像プロファイルの劣化が大きくなつてしまい、十分な精度で空間像を計測することが困難であつた。

この他、従来においても、主としてパターンの結像位置の検出を目的として、スリットをパターンの空間像に対して走査する装置が、例えば特開昭 58-7823 号などに開示されている。しかし、該公報に開示される装置では、スリット幅は、レチクルパターン（基準パターン）の形状に対応して決定されていた。このため、種々の形状（大きさを含む）のパターンの空間像を正確に計測することは困難であつた。

また、空間像計測により、投影光学系の光学特性を計測する場合、その光軸に直交する面内の空間像の位置を計測し、その計測結果に基づいて投影光学系の光学特性を算出することがあるが、そのような場合に計測中に空間像計測器の位置を計測するレーザ干渉計のドリフト等に起因する計測誤差が発生することがあつた。

ところで、従来の露光装置では、例えば搭載された投影光学系の光学特性等を自らの持つ空間像計測器、その他の計測器を用いて計測する、いわゆる自己計測を行う際には、計測用マークが形成された計測専用のレチクル（以下、「専用レチクル」と呼ぶ）が主として用いられていた。

しかしながら、専用レチクルを用いて自己計測を行う場合には、計測の度にその専用レチクルを装置に装着しなければならず、特に最近の露光装置では各種の自己計測を行う必要があるため、例えば各種自己計測を連続的に行うような場合には、異なる専用レチクルに計測の度に交換しなければならない。このため、その作業自身及び専用レチクルの管理が煩雑であった。

また、専用レチクルを装置に装着する度にその専用レチクルの姿勢が変化し、計測誤差を生じることがあった。また、専用レチクルを用いる場合、通常の使用時、例えば連続運転中などには、専用レチクルとデバイス製造用のレチクルとの交換時間が露光装置のスループット低下の要因となるため、それほど頻繁に計測を行うことが困難であった。

## SUMMARY OF THE INVENTION

本発明は、かかる事情の下になされたもので、その第1の目的は、十分な精度で空間像を計測することができる空間像計測方法及び空間像計測装置を提供することにある。

本発明の第2の目的は、投影光学系の光学特性を精度良く計測することができる光学特性計測方法及び光学特性計測装置を提供することにある。

本発明の第3の目的は、投影光学系の光学特性を高精度に調整することができる投影光学系の調整方法を提供することにある。

本発明の第4の目的は、デバイスの生産性の向上に寄与する露光方法及び露光装置を提供することにある。

本発明の第5の目的は、パターンを基板上に精度良く転写することが可能な露光装置を製造する露光装置の製造方法を提供することにある。

本発明の第6の目的は、デバイスの生産性を向上させることができるデバイス製造方法を提供することにある。

一般に、露光装置に備えられる投影光学系の解像度（解像力） $R$ は、

Rayleigh の式で良く知られているように、 $R = k \times \lambda / N.A.$  の関係（ $\lambda$  は照明光の波長、 $N.A.$  は投影光学系の開口数、 $k$  はレジストの解像力の他にプロセスによって決定される定数（プロセス係数）である）で表される。そこで、発明者（萩原）は、かかる点に着目して、種々の実験等を行った結果、空間像計測に用いられる開口の走査方向の幅を、照明光の波長  $\lambda$  及び投影光学系の開口数  $N.A.$  の少なくとも一方を考慮して定めることにより、空間像計測において良好な結果が得られることが判明した。本発明に係る空間像計測方法は、かかる発明者（萩原）の得た新規知見に基づいてなされたものである。

本発明の第 1 の観点からすると、投影光学系によって形成される所定のマークの空間像を計測する空間像計測方法であって、照明光によって前記マークを照明し、前記マークの空間像を前記投影光学系を介して像面上に形成する工程と；前記投影光学系の光軸に垂直な 2 次元平面内で第 1 方向に延び、かつ前記 2 次元平面内で前記第 1 方向に垂直な第 2 方向の幅が前記照明光の波長  $\lambda$  及び前記投影光学系の開口数  $N.A.$  の少なくとも一方を考慮して定められた少なくとも 1 つのスリット状の開口パターンを有するパターン形成部材を、前記像面近傍の前記 2 次元平面に平行な面内で前記第 2 方向に走査するとともに、前記開口パターンを透過した前記照明光を光電変換して前記開口パターンを透過した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を得る工程と；を含む空間像計測方法が提供される。

これによれば、照明光によって所定のマークを照明し、該マークの空間像を投影光学系を介して像面上に形成する。そして、この空間像に対して投影光学系の光軸に垂直な 2 次元平面内で第 1 方向に延び、かつ前記 2 次元平面内で前記第 1 方向に垂直な第 2 方向の幅が照明光の波長  $\lambda$  及び前記投影光学系の開口数  $N.A.$  の少なくとも一方を考慮して定められた少なくとも 1 つのスリット状の開口パターンを有するパターン形成部材を、像面近傍の前記 2 次元平面に平行な面内で第 2 方向に走査するとともに、開口パターンを透過した照明光を

光電変換して開口パターンを透過した照明光の強度に応じた光電変換信号を得る。そして、この光電変換信号に所定の処理を施すことにより、空間像（像強度の分布）を得ることができる。

すなわち、スリットスキャン方式により、所定パターンの空間像を得ることができる。この場合、スリット状の開口パターンの走査方向の幅が照明光の波長及び前記投影光学系の開口数 $N.A.$ の少なくとも一方を考慮して定められているので、十分な精度で空間像を計測することが可能となる。

この場合において、前記開口パターンの第2方向の幅は、前記照明光の波長 $\lambda$ 及び前記投影光学系の開口数 $N.A.$ の一方のみを考慮して定められていても良いし、前記照明光の波長 $\lambda$ 及び前記投影光学系の開口数 $N.A.$ の両者を考慮して定められていても良い。後者の場合には、解像力に影響を与える2つのパラメータである波長 $\lambda$ 及び開口数 $N.A.$ の両者を考慮して開口パターンの走査方向の幅が定められているので、前者に比べても一層精度良く空間像を計測することが可能になる。

本発明の空間像計測方法では、前記開口パターンの前記第2方向の幅は、零より大きく前記照明光の波長 $\lambda$ を前記投影光学系の開口数 $N.A.$ で除した（ $\lambda/N.A.$ ）以下であることが望ましい。ここで、開口パターンの走査方向の幅が、（ $\lambda/N.A.$ ）以下であるとしたのは、第1に、発明者（萩原）が、開口パターンの走査方向の幅（ $2D$ とする）を、 $2D = f(\lambda/N.A.) = n \cdot (\lambda/N.A.)$ として、シミュレーション及び実験等を繰り返し行った結果、係数 $n=1$ とした場合に良好な結果（十分に実用的な結果）が得られたからであり、第2に、後述するように、上記の光電変換信号は、開口パターンと空間像の強度分布とのコンボリューションになるため、計測精度の面からは、開口パターンの走査方向の幅 $2D$ は小さい程良いからである。

この場合において、前記開口パターンの前記第2方向の幅は、前記（ $\lambda/N.A.$ ）の0.8倍以下であることが一層望ましい。上述の如く、計測精度の

面からは、開口パターンの幅は小さい程良く、発明者（萩原）が行ったシミュレーションと実験によれば、 $2D$ が $\lambda / (N \cdot A.)$ の80%以下であれば、より一層実用的であることが確認された。

但し、スループット面からの制約を考慮すると、 $2D$ があまりに小さいと、開口パターンを透過する光強度が小さくなりすぎて、計測が困難となるので、ある程度の大きさは必要である。

本発明の空間像計測方法では、前記開口パターンの前記第2方向の幅は、前記照明光の特性及び前記パターンの種別を含む照明条件によって定まる解像限界のラインアンドスペースパターンのピッチである最小ピッチの半分の奇数倍であることとしても良い。

ここで、コンベンショナル照明の下で、位相シフト法等を用いない通常パターンの場合、上記の最小ピッチは、ほぼ $\lambda / N \cdot A.$ となり、位相シフトパターン、すなわち、位相シフト法を採用した位相シフトマスク（位相シフトレチクル）のパターンの場合には、最小ピッチは、ほぼ $\lambda / (2 N \cdot A.)$ となることが、確認されている。なお、位相シフトマスクとしては、ハーフトーン型、レベンソン型などが挙げられる。

本発明の空間像計測方法では、前記開口パターンの前記第2方向の幅は、前記照明光の波長を $\lambda$ 、前記投影光学系の開口数を $N \cdot A.$ として、 $\{\lambda / (2 N \cdot A.)\}$ の奇数倍として規定されることとしても良い。

本発明の空間像計測方法では、前記光電変換信号をフーリエ変換して空間周波数分布を求め、該求めた空間周波数分布を前記開口パターンの既知の周波数スペクトルで除して元の空間像のスペクトル分布に変換し、該スペクトル分布を逆フーリエ変換することにより元の空間像を回復する工程を更に含むこととすることができる。

本発明の第2の観点からすると、投影光学系の光学特性を計測する光学特性計測方法であって、照明光によって所定のマークを照明し、該マークの空間像

を前記投影光学系を介して像面上に形成する工程と；前記投影光学系の光軸に垂直な２次元平面内で第１方向に延びる所定幅のスリット状の開口パターンを少なくとも１つ有するパターン形成部材を前記像面近傍の前記２次元平面に平行な面内で前記第１方向に垂直な第２方向に走査するとともに、前記開口パターンを透過した前記照明光を光電変換して前記開口パターンを透過した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を得る工程と；前記光電変換信号に基づいて前記投影光学系の光学特性を求める工程と；を含む第１の光学特性計測方法が提供される。

これによれば、照明光によって所定のマークを照明し、該マークの空間像を投影光学系を介して像面上に形成する。この状態で、投影光学系の光軸に垂直な２次元平面内で第１方向に延びる所定幅のスリット状の開口パターンを少なくとも１つ有するパターン形成部材を像面近傍の前記２次元平面に平行な面内で第１方向に垂直な第２方向に走査するとともに、開口パターンを透過した照明光を光電変換して開口パターンを透過した照明光の強度に応じた光電変換信号を得る。そして、この光電変換信号に基づいて投影光学系の光学特性を求める。

すなわち、スリットスキャン方式により、所定のマークの空間像を得ることができ、この得られた光電変換信号に基づいて投影光学系の光学特性を求めるので、投影光学系の光学特性を精度良く計測することが可能となる。

この場合において、前記マークは、前記第２方向に対応する方向に周期性を有するラインアンドスペースパターンから成り、前記光電変換信号の検出を、前記パターン形成部材の前記光軸方向の位置を変化させつつ複数回繰り返し、前記繰り返しにより得られた複数の光電変換信号それぞれに基づいて前記パターン形成部材の前記光軸方向の位置に応じて変化する所定の評価量を求め、該評価量の大小に基づいて前記投影光学系のベストフォーカス位置を求めることができる。評価量は、パターン形成部材の光軸方向の位置に応じて



変化するので、本発明によれば、投影光学系のベストフォーカス位置を精度良く、かつ容易に計測（決定）することができる。

この場合において、前記評価量は、前記複数の光電変換信号それぞれをフーリエ変換して得られるそれぞれの１次周波数成分と零次周波数成分の振幅比であるコントラストであり、前記コントラストが最大となる光電変換信号に対応する前記パターン形成部材の前記光軸方向の位置をベストフォーカス位置とすることとすることができる。

本発明の第１の光学特性計測方法では、前記ベストフォーカス位置の検出を、前記投影光学系の光軸からの距離が異なる複数点に関して繰り返し行うことにより、前記投影光学系の像面形状を検出する工程を更に含むこととすることができる。像面、すなわち、最良結像面は、光軸からの距離が異なる無数の点（すなわち、いわゆる像の高さが異なる無数の点）におけるベストフォーカス点の集合から成る面であるから、ベストフォーカス位置の検出を、前記投影光学系の光軸からの距離が異なる複数点に関して繰り返し行い、その検出結果に基づいて統計的処理を行うことにより容易にかつ正確に像面を求めることが可能になる。

本発明の第１の光学特性計測方法では、前記投影光学系の光軸における前記ベストフォーカス位置の検出を、異なるピッチの複数のラインアンドスペースパターンについて繰り返し行い、前記各パターンに対応する前記ベストフォーカス位置の差に基づいて前記投影光学系の球面収差を求める工程を更に含むこととすることができる。球面収差は、光学系の開口収差の１つであり、光軸上の物点からの種々の開口を持った光線束が光学系に入射したとき、その対応した像点が一点に結像しない現象である。従って、投影光学系の光軸におけるベストフォーカス位置の検出を、異なるピッチの複数のラインアンドスペースパターンについて繰り返し行い、各パターンに対応するベストフォーカス位置の差に基づいて演算により球面収差を簡単に求めることができる。

本発明の第1の光学特性計測方法では、前記空間像の形成と前記光電変換信号の検出とを、前記投影光学系のイメージフィールド内の異なる位置に投影される前記マークの空間像について繰り返し行い、前記繰り返しにより得られた複数の光電変換信号に基づいて個別に対応する空間像の位置をそれぞれ算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のディストーション及び倍率の少なくとも一方を求めることとすることができる。

ここで、ディストーションとは、イメージフィールド内の周辺で本来直線になるべきものが曲った像になる投影光学系の収差であり、ディストーションにより倍率誤差がある場合と同様に、マークの空間像が像面上の所定の位置からずれて（横ずれして）結像される。従って、空間像の位置ずれをそれぞれ算出することにより、結果的にディストーション及び倍率の少なくとも一方を精度良く計測することができる。

この場合において、前記マークは、前記第2方向の幅が前記開口パターンの前記第2方向の幅より大きい矩形パターンを少なくとも1つ含むマークであることとすることができる。ここで、マークは、第2方向の幅が開口パターンの第2方向の幅より大きい矩形パターンを少なくとも1つ含むこととしたのは、マークの第2方向の幅が開口パターンより小さいと、コマ収差等の他の収差の影響により、ディストーションを正確に測定することが困難になるからである。

この場合において、前記各空間像の位置は、前記複数の光電変換信号それぞれの位相を検出し、該位相検出の結果に基づいて算出されることとしても良いし、前記各空間像の位置は、前記複数の光電変換信号それぞれと所定のスライスレベルとの交点に基づいて算出されることとしても良い。前者の場合には、位相検出の手法により、投影光学系のイメージフィールド内の異なる位置に投影されるマークの空間像の位置ずれをそれぞれ精度良く求めることができる。後者の場合には、スライス法を用いたエッジ検出の手法により、投影光学系の

イメージフィールド内の異なる位置に投影されるマークの空間像の位置をそれぞれ精度良く求めることができる。

本発明の第1の光学特性計測方法では、投影光学系のディストーション及び倍率の少なくとも一方を求める場合に、前記マークは、全体として矩形状で、前記第1方向に周期性を有するラインアンドスペースパターンから成ることとすることができる。かかる場合には、例えば投影光学系のディストーション、倍率などの計測に際し、スリットスキャン方式により、マークの空間像の検出が行われる際に、開口パターンがマークの周期方向に垂直な方向に相対走査され、結果的に、そのマークの全体形状と同形状の矩形パターンをスリットスキャンしたときと、同様の空間像の信号を得ることができる。これにより、例えば、最近のCMPプロセスにおいて、ディッシングが生じるため形成が困難とされていた $10\mu\text{m}$ 角のBOXマーク（インナーBOXマーク）パターンなどを実際に形成することなく、かかるマークパターンを用いたときと同等の空間像計測が可能となる。

この場合において、前記各空間像の位置は、前記複数の光電変換信号それぞれと所定のスライスレベルとの交点に基づいて算出されることとすることができる。

本発明の第1の光学特性計測方法では、前記マークは、前記第2方向に対応する方向に周期性を有するラインアンドスペースパターンから成り、前記光電変換信号に基づいて前記投影光学系のコマ収差を求めることとすることができる。

コマ収差は、レンズの種々の輪帯で倍率が異なることによるレンズの収差であり、投影光学系の主軸から離れた距離の画像の部分に生じる。従って、光軸から離れた位置では、ラインアンドスペースパターンの空間像の内、各ラインパターンの線幅はコマ収差に応じて異なることになる。従って、ラインアンドスペースパターンの空間像に対応する光電変換信号に基づいてコマ収差を容易

に計測することができる。

この場合において、前記光電変換信号と所定のスライスレベルとの交点に基づいて前記各ラインパターンの線幅異常値を算出し、該算出結果に基づいて前記コマ収差を算出することとすることができる。かかる場合には、スライス法を用いてエッジ検出の手法により各ラインパターンの線幅異常値を検出するので、コマ収差を精度良く、かつ容易に計測することが可能となる。

本発明の第1の光学特性計測方法では、ラインアンドスペースパターンの空間像に基づいて投影光学系のコマ収差を求める場合に、前記光電変換信号の各ラインパターンのピッチに対応する第1基本周波数成分と、前記ラインアンドスペースパターンの全体の幅に対応する第2周波数成分との位相差を算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のコマ収差を求めることとすることができる。空間像計測の対象となるパターンの走査方向の幅が狭いほど、コマ収差の影響を大きく受けるので、ラインアンドスペースパターンの各ラインパターンの空間像に対するコマ収差の影響と、ラインアンドスペースパターンの全体を1つのパターンと見た場合のそのパターンの空間像に対するコマ収差の影響とは相違する。従って、光電変換信号の各ラインパターンのピッチに対応する第1基本周波数成分と、ラインアンドスペースパターンの全体の幅に対応する第2周波数成分との位相差を算出し、該算出結果に基づいて投影光学系のコマ収差を求めることにより、位相検出の手法により、投影光学系のコマ収差を精度良く求めることができる。

本発明の第1の光学特性計測方法では、前記マークは、前記第2方向に対応する方向に所定間隔で配置された線幅の異なる少なくとも2種類のラインパターンを有する対称マークであり、前記光電変換信号と所定のスライスレベルとの交点に基づいて前記マークの空間像の対称性のずれを算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のコマ収差を求めることとすることができる。走査方向の幅が細いラインパターンの空間像ほどコマ収差の影響により大きく位置ず

れする結果、走査方向に対応する方向に所定間隔で配置された線幅の異なる複数種類のラインパターンを有する対称マークパターンの空間像は、コマ収差が大きいほどその対称性が大きくずれる。従って、スライス法を用いたエッジ検出の手法により、前記対称性マークパターンの空間像の対称性のずれを算出し、その算出結果に基づいて投影光学系のコマ収差を求めることにより、投影光学系のコマ収差を精度良く求めることができる。

本発明の第1の光学特性計測方法では、前記開口パターンの前記第2方向の幅は、前記照明光の波長 $\lambda$ 及び前記投影光学系の開口数 $N.A.$ の少なくとも一方を考慮して定められていることとすることができる。

本発明の第3の観点からすると、投影光学系の光学特性を計測する光学特性計測方法であって、前記投影光学系の有効視野内の第1の検出点に第1マークを位置させた状態で照明光により照明して前記第1マークの空間像を形成し、前記投影光学系の光軸方向に関する第1位置で前記第1マークの空間像に対して計測用パターンを相対的に走査して前記計測用パターンを介した光を光電変換して前記空間像に対応する光強度分布を計測する工程と；前記投影光学系の有効視野内の第2の検出点に第2マークを位置させた状態で照明光により照明して前記第2マークの空間像を形成し、前記投影光学系の光軸方向に関する第2位置で前記第2マークの空間像に対して前記計測用パターンを相対的に走査して前記計測用パターンを介した光を光電変換して前記空間像に対応する光強度分布を計測する工程と；前記計測用パターンが前記光軸方向の第1位置にあるときの前記第1マークの空間像の計測結果から得られる前記第1マークの空間像の前記光軸に直交する面内の第1の結像位置と、前記計測用パターンが前記光軸方向の第2位置にあるときの前記第2マークの空間像の計測結果から得られる前記第2マークの空間像の前記光軸に直交する面内の第2の結像位置との相対位置関係を求め、該相対位置関係から前記投影光学系のテレセントリシティを算出する工程と；を含む第2の光学特性計測方法が提供される。

これによれば、投影光学系の有効視野内の第1の検出点に位置させた第1マークの空間像を光軸方向の第1位置に対応する面内で計測した計測結果から得られる空間像の光軸に直交する面内の結像位置（以下、「第1の結像位置」と呼ぶ）と、投影光学系の有効視野内の第2の検出点に位置させた第2マークの空間像を光軸方向の第2位置に対応する面内で計測した計測結果から得られる空間像の光軸に直交する面内の結像位置（以下、「第2の結像位置」と呼ぶ）との相対位置関係、すなわち光軸直交面内での第1の結像位置と第2の結像位置との相対距離、及び光軸方向の第1の結像位置と第2の結像位置との距離に基づいて、投影光学系のテレセントリシティを算出するので、例えば第1の結像位置、第2の結像位置の計測に際し、レーザ干渉計等の計測値を用いていた場合に、レーザ干渉計にドリフト等が生じていても第1の結像位置、第2の結像位置の計測結果には同等の誤差が含まれる結果、干渉計ドリフトなどに起因する計測誤差の影響の殆どないテレセントリシティの高精度な計測が可能となる。

この場合において、第1マークと第2マークとは異なるマークであっても良いが、前記第1マークと第2マークとは同一のマークであることとしても良い。

本発明の第2の光学特性計測方法では、前記計測用パターンは、前記走査方向の幅が、前記照明光の波長 $\lambda$ 及び前記投影光学系の開口数 $N.A.$ の少なくとも一方を考慮して定められた開口パターンであることとすることができる。

本発明の第4の観点からすると、投影光学系によって形成される所定のマークの空間像を計測する空間像計測装置であって、前記マークの空間像を前記投影光学系を介して像面上に形成するため、前記マークを照明する照明装置と；前記投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びるとともに、これに垂直な第2方向の幅が零より大きく前記照明光の波長 $\lambda$ を前記投影光学系の開口数 $N.A.$ で除した（ $\lambda/N.A.$ ）以下である、少なくとも1つのス

リット状の開口パターンを有するパターン形成部材と；前記開口パターンを透過した前記照明光を光電変換して、前記開口パターンを透過した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を出力する光電変換素子と；前記照明装置により前記マークが照明され、前記像面上に前記空間像が形成された状態で、前記像面近傍の前記２次元平面に平行な面内で前記パターン形成部材を前記第２方向に走査するとともに、前記光電変換素子からの光電変換信号に基づいて前記空間像に対応する光強度分布を計測する処理装置と；を備える空間像計測装置が提供される。

これによれば、照明装置によって所定のマークが照明され、該マークの空間像が投影光学系を介して像面上に形成される。そして、処理装置により、形成された空間像に対して投影光学系の光軸に垂直な２次元平面内で第１方向に延びる少なくとも１つのスリット状の開口パターンを有するパターン形成部材が像面近傍の前記２次元平面に平行な面内で第２方向に走査されるとともに、光電変換素子からの光電変換信号（走査中に開口パターンを透過した照明光を光電変換した電気信号）に基づいて空間像に対応する光強度分布が計測される。すなわち、このようにして、スリットスキャン方式により、所定マークの空間像が計測される。また、この場合、パターン形成部材に形成された開口パターンの走査方向の幅が、 $(\lambda / N, A.)$  以下であるので、実用上十分な高い精度で空間像を計測することができる。

本発明の第５の観点からすると、第１面上のマークを第２面に投影する投影光学系の光学特性を計測する光学特性計測装置であって、本発明の空間像計測装置と；該空間像計測装置による前記光強度分布の計測に際して得られた前記光電変換信号に基づいて前記投影光学系の光学特性を算出する演算装置と；を備える光学特性計測装置が提供される。

これによれば、本発明の空間像計測装置によりマークの空間像、すなわちこれに対応する光強度分布が精度良く計測され、この際に得られた光電変換信号

に基づいて、演算装置により投影光学系の光学特性が算出されるので、光学特性を高精度に求めることが可能になる。

本発明の第6の観点からすると、マスクに形成された回路パターンを投影光学系を介して基板に転写する露光装置であって、前記基板を保持する基板ステージと；前記パターン形成部材が前記基板ステージと一体で移動可能に構成された本発明の空間像計測装置とを備える第1の露光装置が提供される。

これによれば、パターン形成部材が基板ステージと一体で移動可能に構成された本発明の空間像計測装置を備えることから、例えば、マスクに種々の計測マークを形成し、基板ステージと一体でパターン形成部材を移動させつつ、空間像計測装置により、種々の計測マークの空間像を高精度に計測することが可能になる。従って、この計測結果を利用して、例えば投影光学系の光学特性の初期調整等を行うことにより、結果的に露光精度の向上が可能となる。この結果、最終製品であるデバイスの歩留まりを向上させることが可能となり、これにより、デバイスの生産性の向上に貢献することができる。

この場合において、前記空間像計測装置を用いて、種々のマークパターンの空間像に対応する光強度分布を計測し、その計測された光強度分布のデータに基づいて前記投影光学系の光学特性を求める制御装置を更に備えることとすることができる。かかる場合には、制御装置により、種々のマークパターンの空間像に対応する光強度分布を計測し、その計測された光強度分布のデータに基づいて投影光学系の光学特性が求められる。そのため、必要なときに投影光学系の光学特性を求めることが可能となり、この求められた光学特性に応じて露光開始に先立って投影光学系の光学特性を調整することが可能となる。従って、露光精度の向上が可能となる。

本発明の第1の露光装置では、前記基板ステージ上のマークの位置を検出するマーク検出系と；前記空間像計測装置を用いて、前記投影光学系による前記マスクのパターンの投影位置と前記マーク検出系との相対位置関係を検出する



制御装置と；を更に備えることとすることができる。かかる場合には、制御装置により、空間像計測装置を用いて、前記投影光学系による前記マスクのパターンの投影位置、すなわち前記パターンの空間像の結像位置とマーク検出系との相対位置関係（すなわち、マーク検出系のいわゆるベースライン量）が検出される。この場合、ベースライン量の計測に当たり、マスクパターンの投影位置を、空間像計測装置により直接的に計測することができるので、基準マーク板とレチクル顕微鏡とを用いてマスクパターンの投影位置を間接的に計測する場合に比べて、精度の高いベースライン量の計測が可能である。従って、このベースライン量を用いて、露光時等に基板の位置を制御することにより、マスクと基板との重ね合せ精度の向上により露光精度の向上が可能となる。

本発明の第7の観点からすると、照明光により所定のパターンを照明し、前記パターンを投影光学系を介して基板上に転写する露光装置であって、各種自己計測に用いられる複数種類の計測マークが形成された自己計測用原版と；前記自己計測用原版が載置され、前記照明光によって照明可能な前記投影光学系の物体側焦点面位置近傍に前記自己計測用原版を移動させることが可能な自己計測用原版載置ステージと；を備える第2の露光装置が提供される。

これによれば、自己計測用原版載置ステージによって、照明光によって照明可能な投影光学系の物体側焦点面位置近傍に自己計測用原版に形成された各種自己計測に用いられる複数種類の計測マークのいずれをも位置させることができる。このため、照明光を計測マークに照射し、その計測マークの像を投影光学系の像側焦点面近傍に結像させ、その像を検出することにより、専用の計測用原版を別に用意することなく、各種自己計測が可能となる。従って、デバイス製造用の原版と、専用の計測用原版との交換作業等が不要となり、各種自己計測に際しての装置のダウンタイムの短縮が可能となり、結果的に露光装置の稼働率を向上させることが可能となる。この結果、最終製品であるデバイスの生産性の向上に貢献することが可能となる。

本発明の第2の露光装置では、前記投影光学系の光軸に垂直な2次元面内に配置され計測用パターンが形成されたパターン形成部材と、前記計測用パターンを介した前記照明光を光電変換する光電変換素子とを有する空間像計測器と；前記照明光によって前記自己計測用原版の少なくとも一部が照明され、前記投影光学系によってその像側焦点面近傍に前記照明光で照明された前記計測マークの空間像が形成された際に、該空間像と前記計測用パターンとが相対走査されるように前記自己計測用原版載置ステージと前記パターン形成部材との少なくとも一方を駆動する駆動装置と；を更に備えることとすることができる。

この場合において、前記計測用パターンは、前記相対走査される方向の幅が零より大きく前記照明光の波長 $\lambda$ を前記投影光学系の開口数 $N.A.$ で除した $(\lambda/N.A.)$ 以下である、少なくとも1つのスリット状の開口パターンを含むこととすることができる。

本発明の第2の露光装置では、前記自己計測用原版載置ステージは、前記所定のパターンが形成されたマスクが載置されるマスクステージであることとすることができる。

この場合において、前記基板が載置されるとともに、基準マークが設けられた基板ステージと；前記マスクステージ上に存在するマークを観察する観察顕微鏡と；前記基板をロット単位で露光する際に、各ロット先頭の基板の露光時には、前記自己計測用原版、前記空間像計測器、及び前記駆動装置を用いて前記自己計測用原版上の計測マークの空間像計測を行い、その計測結果に基づいて前記投影光学系の倍率を算出するとともに、前記各ロット内の先頭以外の基板の露光時には、自己計測用原版及び前記マスクの一方のマークと、前記基板ステージ上の基準マークの投影光学系を介した像とを前記観察顕微鏡を用いて観察し、その観察結果に基づいて前記投影光学系の倍率を算出する制御装置と；を更に備えることとすることができる。

本発明の第2の露光装置では、前記自己計測用原版は、前記所定のパターン

が形成されたマスクであることとすることができる。

本発明の第2の露光装置では、前記自己計測用原版に形成された計測マークには、前記投影光学系のディストーション計測マーク、ベストフォーカス計測用の繰り返しマーク、ベストフォーカス計測用の疑似孤立線マーク、及び前記基板との重ね合せ誤差計測用のアライメントマークの少なくとも1つが含まれることとすることができる。

本発明の第2の露光装置では、前記自己計測用原版に形成された計測マークには、孤立線マークと、所定のピッチを有するラインアンドスペースマークとが含まれることとすることができる。

本発明の第8の観点からすると、第1面上のパターンを第2面上に投影する投影光学系の調整方法であって、本発明の第1の光学特性計測方法により投影光学系の光学特性を計測する工程と；前記光学特性の計測結果に基づいて前記投影光学系を調整する工程と；を含む投影光学系の調整方法が提供される。

これによれば、本発明の第1の光学特性計測方法により投影光学系の光学特性を精度良く計測することができ、この計測結果に基づいて投影光学系を調整することにより、投影光学系の光学特性を高精度に調整することが可能となる。

本発明の第9の観点からすると、マスクに形成されたパターンを投影光学系を介して基板上に転写する露光方法であって、本発明の投影光学系の調整方法により前記投影光学系を調整する工程と；前記光学特性が調整された前記投影光学系を用いて前記パターンを前記基板上に転写する工程と；を含む露光方法が提供される。

これによれば、本発明の投影光学系の調整方法により光学特性が高精度に調整された投影光学系を用いてマスクのパターンが基板上に転写されるので、前記パターンを精度良く転写することができる。結果的に、最終製品であるデバイスの歩留まりを向上させることが可能となり、これにより、デバイスの生産

性の向上に貢献することができる。

本発明の第10の観点からすると、マスクに形成されたパターンを投影光学系を介して基板上に転写する露光装置の製造方法であって、本発明の第1の光学特性計測方法により投影光学系の光学特性を計測する工程と；前記光学特性の計測結果に基づいて前記投影光学系を調整する工程と；を含む露光装置の製造方法が提供される。

これによれば、本発明の第1の光学特性計測方法により投影光学系の光学特性を精度良く計測することができ、この計測結果に基づいて投影光学系が調整されるので、投影光学系の光学特性を精度良く調整することができる。従って、この光学特性が精度良く調整された投影光学系を介してマスクに形成されたパターンを基板上に精度良く転写することが可能となる。

また、リソグラフィ工程において、本発明の第1の露光装置を用いて露光を行うことにより、基板上にパターンを精度良く転写することができ、最終製品であるデバイスの歩留まりが向上する。また、リソグラフィ工程において、本発明の第2の露光装置を用いて露光を行うことにより、露光装置の稼働率の向上により最終製品であるデバイスの生産性の向上が可能となる。従って、本発明の更に別の観点からは、本発明の第1、第2の露光装置のいずれかを用いるデバイス製造方法が提供される。

#### BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

In the accompanying drawings ;

図1は、本発明の第1の実施形態に係る露光装置の概略的な構成を示す図；

図2は、図1のアライメント系及び空間像計測器の内部構成を示す図；

図3は、光センサをウエハステージの外部に配置した空間像計測器の変形例を示す図；

図4は、光センサをウエハステージの内部に配置した空間像計測器の変形例

を示す図；

図 5 は、アライメント系によりウエハ上のアライメントマークを検出している様子を示す図；

図 6 は、アライメント系のベースラインの計測に際して、アライメント系により空間像計測器のスリットを検出している状態を示す図；

図 7 は、図 1 のレチクルマーク板を示す底面図；

図 8 は、レチクルマーク板上のマーク配置の一例を示す図；

図 9 A は、空間像の計測に際してスリット板上に空間像 P M' が形成された状態の空間像計測器を示す平面図；

図 9 B はその空間像計測の際に得られる光電変換信号（光強度信号）P の一例を示す線図；

図 10 は、スリット板上のスリットの配置を示す平面図；

図 11 は、ライン幅  $0.2\ \mu\text{m}$ 、デューティ比 50% の L/S マークの空間像を計測した場合に対応する結像シミュレーションの結果を示す線図であって、ベストフォーカス位置でのシミュレーション結果を示す線図；

図 12 は、図 11 の強度信号 P 3 をフーリエ変換した際の空間周波数成分を、元の強度信号 P 3 とともに示す線図；

図 13 は、ベストフォーカス位置から  $0.2\ \mu\text{m}$  デフォーカスした場合のシミュレーション結果を示す線図；

図 14 は、図 13 の強度信号 P 3 をフーリエ変換した際の空間周波数成分を、元の強度信号 P 3 とともに示す線図；

図 15 は、ベストフォーカス位置から  $0.3\ \mu\text{m}$  デフォーカスした場合のシミュレーション結果を示す線図；

図 16 は、図 15 の強度信号 P 3 をフーリエ変換した際の空間周波数成分を、元の強度信号 P 3 とともに示す線図；

図 17 は、像面形状の検出に際して用いられる計測用レチクルの一例を示す

平面図；

図 1 8 は、球面収差の検出に際して用いられる計測用レチクルの一例を示す平面図；

図 1 9 は、倍率及びディストーション測定の際のスリット板 9 0 を示す平面図；

図 2 0 は、倍率及びディストーション測定に際して用いられる計測用レチクルの一例を示す平面図；

図 2 1 は、大きな L / S パターンから成る計測マークが形成されたレチクルを用いて空間像計測を行う際に、スリット板上にその計測マークの空間像が形成された状態の空間像計測器を示す平面図；

図 2 2 は、擬似ボックスマークその他の計測マークが形成されたマークブロックの一例を示す図；

図 2 3 は、コマ収差の第 1 の計測方法を説明するための図であって、レジスト像の一例を示す図；

図 2 4 は、コマ収差の第 1 の計測方法に用いられる計測用レチクルの一例を示す平面図；

図 2 5 は、5 本の L / S パターンが所定周期で複数組み配置された複合マークパターンを、各計測マークとして用いた場合にその空間像が形成されたスリット板を示す平面図；

図 2 6 は、図 2 5 に示される空間像が、2 つの基本的な周波数成分を有することを説明するための図；

図 2 7 は、コマ収差の第 2 の計測方法に用いられる計測マークを拡大して示す図；

図 2 8 は、線幅の太いラインパターンと線幅の細いラインパターンが計測方向に所定間隔で並んだ左右対称の 1 次元マークから成る計測マークの空間像が形成されたスリット板を示す平面図；

図 2 9 は、図 2 8 の場合の 1 次元マークが繰り返し配置された計測マークの空間像が形成されたスリット板を示す平面図；

図 3 0 は、コマ収差の第 2 の計測方法に用いられる計測用レチクルの一例を示す平面図；

図 3 1 は、スリット板を 1 3 段階（ステップ）で Z 軸方向に変化させ、各点で得られた 1 3 点のコントラストの計測値（×印）を横軸を Z 軸として示す図；

図 3 2 は、スリット板を 1 3 段階（ステップ）で Z 軸方向に変化させ、各点で得られた 1 3 点の 1 次成分の振幅の値（×印）を横軸を Z 軸として示す図；

図 3 3 A、図 3 3 B は、それぞれ所定条件の下で、フォト・マルチプライヤ・チューブを用いた例を想定して（6）式を適用した場合の、フォーカス検出に関する S/N 比を示すグラフ；

図 3 4 A、図 3 4 B は、図 3 3 A、図 3 3 B にそれぞれ対応するコントラストを示すグラフ；

図 3 5 A、図 3 5 B は、図 3 3 A、図 3 3 B にそれぞれ対応するファースト・オーダーを示すグラフ；

図 3 6 A、図 3 6 B は、図 3 3 A、図 3 3 B と同一条件で、（8）式を適用した場合のフォーカス検出に関する S/N 比を示すグラフ；

図 3 7 A、図 3 7 B は、スリット幅が最小ハーフピッチの 1 倍のとき、3 倍のときの、スリット透過光の強度信号、その微分信号及び空間像強度のシミュレーションデータを、それぞれ示す図；

図 3 8 A、図 3 8 B は、スリット幅が最小ハーフピッチの 5 倍のとき、7 倍のときの、スリット透過光の強度信号、その微分信号及び空間像強度のシミュレーションデータを、それぞれ示す図；

図 3 9 は、スリット幅が解像限界のハーフピッチの 1、3、5 倍の時の周波数特性を示す図；

図４０は、本発明の第２の実施形態に係る露光装置の構成を一部省略して示す図；

図４１は、第２の実施形態の露光装置において、アライメント系ＡＬＧ２のベースライン計測に際して、レーザビームスポットの位置を空間像計測器を用いて計測しているときの状態を示す図；

図４２Ａ、図４２Ｂは、空間像計測器のスリット板上のスリットの他の配置例、及びそのようなスリットが形成された空間像計測器の使用方法を説明するための図；

図４３は、本発明に係るデバイス製造方法の実施形態を説明するためのフローチャート；

図４４は、図４３のステップ２０４の詳細を示すフローチャート；  
and

図４５Ａ～図４５Ｃは、従来の空間像計測方法について説明するための図。

## DETAILED DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS

### 《第１の実施形態》

以下、本発明の第１の実施形態を図１～図３９に基づいて説明する。図１には、第１の実施形態に係る露光装置１００の概略的な構成が示されている。この露光装置１００は、ステップ・アンド・スキャン方式の走査型投影露光装置、すなわちいわゆるスキヤニング・ステッパである。

この露光装置１００は、光源及び照明光学系を含む照明系１０、マスクとしてのレチクルＲを保持するレチクルステージＲＳＴ、投影光学系ＰＬ、基板としてのウエハＷを保持してＸＹ平面内を自在に移動可能な基板ステージとしてのウエハステージＷＳＴ、及びこれらを制御する制御系等を備えている。

前記照明系１０は、光源、照度均一化光学系（コリメータレンズ、フライアイレンズ等から成る）、照明系開口絞り板（通常照明用の円形の開口絞り、小



$\sigma$ 照明用の小 $\sigma$ 絞り、輪帯照明用の輪帯絞り、変形照明用の四重極絞り等がほぼ等角度間隔で形成されている)、リレーレンズ系、照明視野絞りとしてのレチクルブラインド及びコンデンサレンズ系等(いずれも図1では図示省略)を含んで構成されている。

前記光源としては、ここでは、一例として、KrFエキシマレーザ光(波長248nm)又はArFエキシマレーザ光(波長193nm)を出力するエキシマレーザ光源が用いられるものとする。

前記レチクルブラインドは、開口形状が固定の不図示の固定レチクルブラインドと開口形状が可変の可動レチクルブラインド12(図1では図示省略、図2参照)とから構成されている。固定レチクルブラインドは、レチクルRのパターン面の近傍又はその共役面から僅かにデフォーカスした面に配置され、レチクルR上の長方形スリット状の照明領域(図1における紙面直交方向であるX軸方向に細長く伸び図1における紙面内左右方向であるY軸方向の幅が所定幅の長方形スリット状の照明領域)1ARを規定する長方形開口が形成されている。また、可動レチクルブラインド12は、レチクルRのパターン面に対する共役面に配置され、走査露光時の走査方向(ここでは、Y軸方向とする)及び非走査方向(X軸方向とする)にそれぞれ対応する方向の位置及び幅が可変の開口部を有する。但し、図2及び図3では説明を簡単にするために、可動レチクルブラインド12がレチクルRに対して照明系側近傍に配置されているように示されている。

照明系10によると、光源で発生した露光光としての照明光(以下、「照明光IL」と呼ぶ)は不図示のシャッタを通過した後、照度均一化光学系により照度分布がほぼ均一な光束に変換される。照度均一化光学系から射出された照明光ILは、照明系開口絞り板上のいずれか開口絞り、リレーレンズ系を介して前記レチクルブラインドに達する。このレチクルブラインドを通過した光束は、リレーレンズ系、コンデンサレンズ系を通過して回路パターン等が描かれ

たレチクルRの照明領域 I A R を均一な照度で照明する。

なお、可動レチクルブラインド 1 2 は、走査露光の開始時及び終了時に主制御装置 2 0 によって制御され、照明領域 I A R を更に制限することによって、不要な部分の露光が防止されるようになっている。また、本実施形態では、可動レチクルブラインド 1 2 が、後述する空間像計測器による空間像の計測の際の照明領域の設定にも用いられる。

前記レチクルステージ R S T 上には、レチクルRが、例えば真空吸着（又は静電吸着）により固定されている。レチクルステージ R S T は、ここでは、リニアモータ等を含む不図示のレチクルステージ駆動系により、後述する投影光学系 P L の光軸 A X に垂直な X Y 平面内で 2 次元的に（X 軸方向、Y 軸方向及び X Y 平面に直交する Z 軸回りの回転方向（ $\theta_z$  方向）に）微少駆動可能であるとともに、レチクルベース 2 6 上を Y 軸方向に指定された走査速度で移動可能となっている。

レチクルステージ R S T の - Y 側端部近傍には、自己計測用原版としてのレチクルフィデューシャルマーク板（以下、「レチクルマーク板」と略述する）R F M が X 軸方向に沿ってかつレチクルRと並んで配置されている。このレチクルマーク板 R F M は、レチクルRと同材質のガラス素材、例えば合成石英やホタル石、フッ化リチウムその他のフッ化物結晶などから成り、レチクルステージ R S T に固定されている。なお、このレチクルマーク板 R F M の具体的構成等については後述する。レチクルステージ R S T は、レチクルRの全面とレチクルマーク板 R F M の全面とが少なくとも投影光学系 P L の光軸 A X を横切ることができる程度の Y 軸方向の移動ストロークを有している。

また、レチクルステージ R S T には、レチクルR及びレチクルマーク板 R F M の下方に、照明光 I L の通路となる開口がそれぞれ形成されている。また、レチクルベース 2 6 の投影光学系 P L のほぼ真上の部分には、照明光 I L の通路となる、照明領域 I A R より大きな長方形の開口が形成されている。

レチクルステージ R S T 上には、レチクルレーザ干渉計（以下、「レチクル干渉計」という）13からのレーザビームを反射する移動鏡15が固定されており、レチクルステージ R S T の X Y 面内の位置（Z 軸回りの回転方向である  $\theta_z$  方向の回転を含む）はレチクル干渉計13によって、例えば0.5～1 nm 程度の分解能で常時検出される。ここで、実際には、レチクルステージ R S T 上には走査露光時の走査方向（Y 軸方向）に直交する反射面を有する移動鏡と非走査方向（X 軸方向）に直交する反射面を有する移動鏡とが設けられ、レチクル干渉計13は Y 軸方向に少なくとも2軸、X 軸方向に少なくとも1軸設けられているが、図1ではこれらが代表的に移動鏡15、レチクル干渉計13として示されている。

レチクル干渉計13からのレチクルステージ R S T の位置情報は、ワークステーション（又はマイクロコンピュータ）から成る主制御装置20に送られ、主制御装置20ではレチクルステージ R S T の位置情報に基づいてレチクルステージ駆動系を介してレチクルステージ R S T を駆動制御する。

また、レチクル R の上方には、投影光学系 P L を介してレチクル R 上又はレチクルマーク板 R F M 上のマークとウエハステージ W S T 上の後述する基準マーク板 F M 上の基準マークとを同時に観察するための露光波長を用いた T T R（Through The Reticle）アライメント系から成る観察顕微鏡としての一对のレチクルアライメント顕微鏡（以下、便宜上「R A 顕微鏡」と呼ぶ）28（但し、図1においては紙面奥側の R A 顕微鏡は不図示）が設けられている。これらの R A 顕微鏡28の検出信号は、不図示のアライメント制御装置を介して、主制御装置20に供給されるようになっている。この場合、レチクル R からの検出光をそれぞれの R A 顕微鏡28に導くための不図示の偏向ミラーが移動自在に配置され、露光シーケンスが開始されると、主制御装置20からの指令のもとで、不図示のミラー駆動装置により偏向ミラーが待避される。なお、R A 顕微鏡28と同等の構成は、例えば特開平7-176468号公報及びこれに

対応する米国特許第5, 646, 413号などに開示されている。上記公報及び米国特許における開示を援用して本明細書の記載の一部とする。

前記投影光学系P Lは、レチクルステージR S Tの図1における下方に配置され、その光軸A Xの方向がZ軸方向とされ、ここでは両側テレセントリックな縮小系であり、光軸A X方向に沿って所定間隔で配置された複数枚のレンズエレメントから成る屈折光学系が使用されている。この投影光学系P Lの投影倍率は、例えば1/4倍（又は1/5倍）等となっている。このため、照明系10からの照明光I LによってレチクルR上のスリット状照明領域I A Rが照明されると、このレチクルRを通過した照明光I Lにより、投影光学系P Lを介してそのスリット状照明領域I A R内のレチクルRの回路パターンの縮小像（部分倒立像）が表面にフォトリソが塗布されたウエハW上の前記照明領域I A Rに共役な露光領域I Aに形成される。

前記ウエハステージW S Tは、ステージベース16上面に沿って例えば磁気浮上型2次元リニアアクチュエータから成る不図示のウエハステージ駆動系により、X Y 2次元面内（ $\theta_z$ 回転を含む）で自在に駆動されるようになっている。ここで、2次元リニアアクチュエータは、X駆動コイル、Y駆動コイルの他、Z駆動コイルをも有しているため、ウエハステージW S Tは、Z、 $\theta_x$ （X軸回りの回転方向）、 $\theta_y$ （Y軸回りの回転方向）の3自由度方向にも微小駆動が可能な構成となっている。

ウエハステージW S T上には、ウエハホルダ25が載置され、このウエハホルダ25によってウエハWが真空吸着（又は静電吸着）によって保持されている。また、ウエハステージW S T上には、ベースライン計測用基準マーク、レチクルアライメント用の基準マーク（この基準マークは後述する倍率測定の際にも用いられる）、その他の基準マークが形成された基準マーク板F Mが固定されている。この基準マーク板F Mの表面はウエハWとほぼ同一高さとされている。

なお、ウエハステージWSTに代えて、リニアモータあるいは平面モータ等の駆動系によってXY2次元面内でのみ駆動される2次元移動ステージを用いる場合には、ウエハホルダ25を、Z、 $\theta_x$ 、 $\theta_y$ の3自由度方向に例えばボイスコイルモータ等によって微少駆動されるZ・レベリングテーブルを介してその2次元移動ステージ上に搭載すれば良い。

前記ウエハステージWST上には、ウエハレーザ干渉計（以下、「ウエハ干渉計」という）31からのレーザビームを反射する移動鏡27が固定され、外部に配置されたウエハ干渉計31により、ウエハステージWSTのZ方向を除く5自由度方向（X、Y、 $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、及び $\theta_z$ 方向）の位置が例えば0.5～1nm程度の分解能で常時検出されている。

ここで、実際には、ウエハステージWST上には、走査露光時の走査方向であるY軸方向に直交する反射面を有する移動鏡と非走査方向であるX軸方向に直交する反射面を有する移動鏡とが設けられ、ウエハ干渉計31はY軸方向及びX軸方向にそれぞれ複数軸設けられているが、図1ではこれらが代表的に移動鏡27、ウエハ干渉計31として示されている。ウエハステージWSTの位置情報（又は速度情報）は主制御装置20に送られ、主制御装置20では前記位置情報（又は速度情報）に基づいて不図示のウエハステージ駆動系を介してウエハステージWSTのXY面内の位置を制御する。

また、ウエハステージWSTの内部には、投影光学系PLの光学特性の計測に用いられる空間像計測器59を構成する光学系の一部が配置されている。ここで、空間像計測器59の構成について詳述する。この空間像計測器59は、図2に示されるように、ウエハステージWSTに設けられたステージ側構成部分、すなわちパターン形成部材としてのスリット板90、レンズ84、86から成るリレー光学系、光路折り曲げ用のミラー88、送光レンズ87と、ウエハステージWST外部に設けられたステージ外構成部分、すなわちミラーM、受光レンズ89、光電変換素子としての光センサ24、及び該光センサ24が

送光レンズ 87 によってウエハステージ W S T の外部に送り出される照明光束の光路上には、X 軸方向に所定長さを有するミラー M が傾斜角  $45^{\circ}$  で斜設されている。このミラー M によって、ウエハステージ W S T の外部に送り出された照明光束の光路が鉛直上方に向けて  $90^{\circ}$  折り曲げられるようになっている。この折り曲げられた光路上に送光レンズ 87 に比べて大径の受光レンズ 89 が配置されている。この受光レンズ 89 の上方には、光センサ 24 が配置されている。これら受光レンズ 89 及び光センサ 24 は、所定の位置関係を保ってケース 92 内に収納され、該ケース 92 は取付け部材 93 を介してベース 1

6の上面に植設された支柱94の上端部近傍に固定されている。

前記光センサ24としては、微弱な光を精度良く検出することが可能な光電変換素子（受光素子）、例えばフォト・マルチプライヤ・チューブ（PMT、光電子増倍管）などが用いられる。光センサ24の出力信号を処理する信号処理回路42は、増幅器、サンプルホルダ、A/Dコンバータ（通常16ビットの分解能のものが用いられる）などを含んで構成される。

なお、前述の如く、スリット22は反射膜83に形成されているが、以下においては、便宜上スリット板90にスリット22が形成されているものとして説明を行う。なお、スリット22の配置、及び寸法については、後述する。

上述のようにして構成された空間像計測器59によると、レチクルR又はレチクルマーク板RFMに形成された計測マークの投影光学系PLを介しての投影像（空間像）の計測（これについては後述する）の際に、投影光学系PLを透過してきた照明光ILによってスリット板90が照明されると、そのスリット板90上のスリット22を透過した照明光ILがレンズ84、ミラー88、レンズ86及び送光レンズ87を介してウエハステージWSTの外部に導き出される。そして、そのウエハステージWSTの外部に導き出された光は、ミラーMによって光路が鉛直上方に折り曲げられ、受光レンズ89を介して光センサ24によって受光され、該光センサ24からその受光量に応じた光電変換信号（光量信号）Pが信号処理回路42を介して主制御装置20に出力される。

本実施形態の場合、計測マークの投影像（空間像）の計測はスリットスキャン方式により行われるので、その際には、送光レンズ87が、受光レンズ89及び光センサ24に対して移動することになる。そこで、空間像計測器59では、所定の範囲内で移動する送光レンズ87を介した光がすべて受光レンズ89に入射するように、各レンズ、及びミラーMの大きさが設定されている。

このように、空間像計測器59では、スリット板90、レンズ84、86、ミラー88、及び送光レンズ87により、スリット22を介した光をウエハス

テージWST外に導出する光導出部が構成され、受光レンズ89及び光センサ24によって、ウエハステージWST外へ導出された光を受光する受光部が構成されている。この場合、これら光導出部と受光部とは、機械的に分離されている。そして、空間像計測に際してのみ、光導出部と受光部とは、ミラーMを介して光学的に接続される。

すなわち、空間像計測器59では、光センサ24がウエハステージWSTの外部の所定位置に設けられているため、光センサ24の発熱に起因してレーザ干渉計31の計測精度等に悪影響を与えたりすることがない。また、ウエハステージWSTの外部と内部とをライトガイド等により接続していないので、ウエハステージWSTの外部と内部とがライトガイドにより接続された場合のようにウエハステージWSTの駆動精度が悪影響を受けることもない。

なお、空間像計測器の構成は、上記に限らず、例えば図3に示される空間像計測器59'のような構成を採用しても良い。この空間像計測器59'は、空間像計測器59と基本的に同様に構成されている。但し、この空間像計測器59'は、以下の点において、空間像計測器59とその構成が異なっている。

すなわち、図3に示されるように、ウエハステージWSTには、その上面がウエハWの表面とほぼ同一面とされた2つの凸部58a、58bが設けられている。凸部58aには、図2の場合と同様にして構成されたスリット板90が設けられ、該スリット板90下方のウエハステージWSTの内部には、レンズ84、86及びミラー88が図2と同様の位置関係で配置されている。この場合、ウエハステージWSTの内部には、ライトガイド85も収納されている。このライトガイド85は、その入射端85aが、スリット22が形成された受光面に共役な位置に配置されている。また、このライトガイド85の射出端85bは、凸部58bの上面に固定された送光レンズ87のほぼ真下に配置されている。送光レンズ87の上方には、該送光レンズ87に比べて大径の受光レンズ89が配置されている。この受光レンズ89の上方の射出端85bと共役



な位置には、光センサ２４が配置されている。これら受光レンズ８９及び光センサ２４は、上記の位置関係を保ってケース９２内に収納され、該ケース９２は不図示の固定部材に固定されている。

この図３の空間像計測器５９’では、レチクルＲ又はレチクルマーク板ＲＦＭに形成された計測マークＰＭの投影光学系ＰＬを介しての投影像（空間像）の計測の際に、投影光学系ＰＬを透過してきた照明光ＩＬによって空間像計測器５９’を構成するスリット板９０が照明されると、そのスリット板９０上のスリット２２を透過した照明光ＩＬがレンズ８４、ミラー８８及びレンズ８６を介してライトガイド８５の入射端８５ａに入射する。ライトガイド８５で導かれた光は、その射出端８５ｂから射出された後、送光レンズ８７を介してウエハステージＷＳＴの外部に導き出される。そして、そのウエハステージＷＳＴの外部に導き出された光は、受光レンズ８９を介して光センサ２４によって受光され、該光センサ２４からその受光量に応じた光電変換信号（光量信号）Ｐが主制御装置２０に出力される。

この場合、計測マークの投影像の計測はスリットスキャン方式により行われるので、その際には、送光レンズ８７に対して受光レンズ８９及び光センサ２４が、移動することになる。そこで、この空間像計測器５９’では、所定の範囲内で移動する送光レンズ８７を介した光がすべて受光レンズ８９に入射するように、各レンズの大きさが設定されている。

この空間像計測器５９’では、スリット板９０、レンズ８４、８６、ミラー８８、ライトガイド８５及び送光レンズ８７により、スリット２２を介した光をウエハステージＷＳＴ外に導出する光導出部が構成されている。この場合も、光導出部と前記受光部とは、機械的に分離されており、空間像計測に際してのみ、光導出部と受光部とは、送光レンズ８７と受光レンズ８９とを介して光学的に接続される。従って、光センサ２４の発熱に起因してレーザ干渉計３１の計測精度等に悪影響を与えたりすることがないとともに、ウエハステージＷ

S Tの外部と内部とがライトガイドにより接続された場合のようにウエハステージW S Tの駆動精度が悪影響を受けることもない。

勿論、熱の影響を排除できるような場合には、図4に示される空間像計測器5 9”のように、光センサ2 4をウエハステージW S Tの内部に設けても良い。なお、図3及び図4には、レチクルR上の計測マークP Mの空間像を計測している状態が示されている。

なお、空間像計測器5 9（5 9’又は5 9”）を構成するスリット板9 0上のスリット2 2の形状、寸法等、及び空間像計測器5 9（5 9’又は5 9”）を用いて行われる空間像計測方法、結像特性の計測方法などについては、後に詳述する。また、以下においては、特に区別が必要な場合を除き、空間像計測器5 9、5 9’、5 9”を代表して空間像計測器5 9と記述するものとする。

図1に戻り、投影光学系P Lの側面には、ウエハW上のアライメントマーク（位置合わせマーク）を検出するマーク検出系としてのオフアクシス・アライメント系A L G 1が設けられている。本実施形態では、このアライメント系A L G 1として、画像処理方式のアライメントセンサ、いわゆるF I A（Field Image Alignment）系が用いられている。このアライメント系A L G 1は、図2～図4に示されるように、アライメント用光源3 2、ハーフミラー3 4、第1対物レンズ3 6、第2対物レンズ3 8、撮像素子（C C D）4 0等を含んで構成されている。ここで、光源3 2としては、ブロードバンドの照明光を出射するハロゲンランプ等が用いられる。このアライメント系A L G 1では、図5に示されるように、光源3 2からの照明光により、ハーフミラー3 4、第1対物レンズ3 6を介してウエハW上のアライメントマークM wを照明し、そのアライメントマーク部分からの反射光を第1対物レンズ3 6、ハーフミラー3 4、第2対物レンズ3 8を介して撮像素子4 0で受光する。これにより、撮像素子の受光面にアライメントマークM wの明視野像が結像される。そして、この明視野像に対応する光電変換信号、すなわちアライメントマークM wの反射像

に対応する光強度信号が撮像素子40から不図示のアライメント制御装置を介して主制御装置20に供給される。主制御装置20では、この光強度信号に基づき、アライメント系ALG1の検出中心を基準とするアライメントマークMwの位置を算出するとともに、その算出結果とそのときのウエハ干渉計31の出力であるウエハステージWSTの位置情報とに基づいて、ウエハ干渉計31の光軸で規定されるステージ座標系におけるアライメントマークMwの座標位置を算出するようになっている。

更に、本実施形態の露光装置100では、図1に示されるように、主制御装置20によってオンオフが制御される光源を有し、投影光学系PLの結像面に向けて多数のピンホール又はスリットの像を形成するための結像光束を、光軸AXに対して斜め方向より照射する照射系60aと、それらの結像光束のウエハW表面での反射光束を受光する受光系60bとから成る斜入射光式の多点焦点位置検出系が設けられている。主制御装置20では、投影光学系PLにフォーカス変動が生じた場合には、受光系60b内の図示しない平行平板の反射光束の光軸に対する傾きを制御することにより、投影光学系PLのフォーカス変動に応じて多点焦点位置検出系(60a、60b)にオフセットを与えてそのキャリブレーションを行うようになっている。なお、本実施形態の多点焦点位置検出系(60a、60b)と同様の多点焦点位置検出系の詳細な構成は、例えば特開平6-283403号公報及びこれに対応する米国特許第5,448,332号等の開示されており、上記公報及び米国特許における開示を援用して本明細書の記載の一部とする。

主制御装置20では、後述する走査露光時等に、受光系60bからの焦点ずれ信号(デフォーカス信号)、例えばSカーブ信号に基づいて焦点ずれが零となるように、不図示のウエハステージ駆動系を介してウエハステージWSTのZ軸方向への移動、及び2次元点に傾斜(すなわち、 $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 方向の回転)を制御する、すなわち多点焦点位置検出系(60a、60b)を用いてウエハ

ステージWSTの移動を制御することにより、照明光ILの照射領域（照明領域IARと結像関係）内で投影光学系PLの結像面とウエハWの表面とを実質的に合致させるオートフォーカス（自動焦点合わせ）及びオートレベリングを実行する。

次に、本実施形態の露光装置100における露光工程の動作について簡単に説明する。

まず、不図示のレチクル搬送系によりレチクルRが搬送され、ローディングポジションにあるレチクルステージRSTに吸着保持される。次いで、主制御装置20により、ウエハステージWST及びレチクルステージRSTの位置が制御され、レチクルR上に形成された不図示のレチクルアライメントマークの投影像（空間像）が空間像計測器59を用いて後述するようにして計測され、レチクルパターン像の投影位置が求められる。すなわち、レチクルアライメントが行われる。なお、レチクルアライメントは、前述した一対のRA顕微鏡28により、レチクルR上の一対のレチクルアライメントマーク（不図示）の像とウエハステージWST上の基準マーク板FMに形成されたレチクルアライメント用基準マークの投影光学系PLを介した像とを同時に観察し、両マーク像の相対位置関係と、そのときのレチクル干渉計13及びウエハ干渉計31の計測値とに基づいてレチクルパターン像の投影位置を求めることにより行っても良い。

次に、主制御装置20により、スリット板90がアライメント系ALG1の直下へ位置するように、ウエハステージWSTが移動され、アライメント系ALG1によって空間像計測器59の位置基準となるスリット22が検出される（図6参照）。主制御装置20では、このアライメント系ALG1の検出信号及びそのときのウエハ干渉計31の計測値、並びに先に求めたレチクルパターン像の投影位置に基づいて、レチクルRのパターン像の投影位置とアライメント系ALG1との相対位置、すなわちアライメント系ALG1のベースライン

量を求める。

かかるベースライン計測が終了すると、主制御装置20により、例えば特開昭61-44429号公報及びこれに対応する米国特許第4,780,617号などに詳細に開示されるEGA（エンハンスト・グローバル・アライメント）等のウエハアライメントが行われ、ウエハW上の全てのショット領域の位置が求められる。このウエハアライメントに際して、ウエハW上の複数のショット領域のうちの予め定められた所定のサンプルショットのウエハアライメントマークMwがアライメント系ALG1を用いて、前述した如くして計測される（図5参照）。なお、上記公報及び米国特許における開示を援用して本明細書の記載の一部とする。

次いで、主制御装置20では、上で求めたウエハW上の各ショット領域の位置情報及びベースライン量に基づいて、干渉計31、13からの位置情報をモニタしつつ、ウエハステージWSTを第1ショット領域の露光のための走査開始位置（加速開始位置）に位置決めするとともに、レチクルステージRSTを走査開始位置に位置決めして、その第1ショット領域の走査露光を行う。

すなわち、主制御装置20では、レチクルステージRSTとウエハステージWSTとのY軸方向逆向きの相対走査を開始し、両ステージRST、WSTがそれぞれの目標走査速度に達すると、照明光ILによってレチクルRのパターン領域が照明され始め、走査露光が開始される。この走査露光の開始に先立って、光源の発光は開始されているが、主制御装置20によって可動レチクルブラインド12の各ブレードの移動がレチクルステージRSTの移動と同期制御されているため、レチクルR上のパターン領域外への露光光ELの照射が防止されることは、通常のスキヤニング・ステッパと同様である。

主制御装置20では、特に上記の走査露光時にレチクルステージRSTのY軸方向の移動速度VrとウエハステージWSTのY軸方向の移動速度Vwとが投影光学系PLの投影倍率に応じた速度比に維持されるようにレチクルステー

ジ R S T 及びウエハステージ W S T を同期制御する。

そして、レチクル R のパターン領域の異なる領域が照明光 I L で逐次照明され、パターン領域全面に対する照明が完了することにより、ウエハ W 上の第 1 ショット領域の走査露光が終了する。これにより、レチクル R の回路パターンが投影光学系 P L を介して第 1 ショット領域に縮小転写される。

こうして第 1 ショット領域の走査露光が終了すると、ウエハステージ W S T を第 2 ショット領域の露光のための走査開始位置（加速開始位置）へ移動させるショット間のステッピング動作を行う。そして、その第 2 ショット領域の走査露光を上述と同様にして行う。以後、第 3 ショット領域以降も同様の動作を行う。

このようにして、ショット領域間のステッピング動作とショット領域の走査露光動作とが繰り返され、ステップ・アンド・スキャン方式でウエハ W 上の全てのショット領域にレチクル R のパターンが転写される。

ここで、上記の走査露光中には、投影光学系 P L に一体的に取付けられたフォーカスセンサ（60a、60b）を用いて、前述したオートフォーカス、オートレベリングが行われる。

ところで、上記の走査露光中に、レチクル R のパターンとウエハ W 上のショット領域に既に形成されたパターンとが正確に重ね合わせられるためには、投影光学系 P L の光学特性（結像特性を含む）やベースライン量が正確に計測されていること、及び投影光学系 P L の光学特性が所望の状態に調整されていることなどが重要である。

本実施形態では、上記の光学特性の計測に、前述した空間像計測器 59 が用いられる。以下、この空間像計測器 59 による空間像計測、及び投影光学系 P L の光学特性の計測等について詳述する。

図 2 には、空間像計測器 59 を用いて、レチクルマーク板 R F M に形成された計測マーク P M の空間像が計測されている最中の状態が示されている。なお

、レチクルマーク板 R F M に代えて、図 3 及び図 4 に示されるように、空間像計測専用のレチクル、あるいはデバイスの製造に用いられるレチクル R に専用の計測マーク P M を形成したものなどを用いることも可能である。

ここで、空間像計測の説明に先立って、レチクルマーク板 R F M について、図 7 及び図 8 に基づいて説明する。

図 7 には、レチクルステージ R S T 上に固定されたレチクルマーク板 R F M が取り出して示されている。この図 7 は、図 1 における底面図に相当する。

このレチクルマーク板 R F M は、Y 軸方向（走査方向）の長さが例えば約 16 mm（投影倍率が 1 / 4 倍としてウエハ上で 4 mm）、X 軸方向（非走査方向）の長さが例えば約 150 mm である。このレチクルマーク板 R F M の非スキャン方向（X 軸方向）の両端部を除く中央部約 100 mm（投影倍率が 1 / 4 倍としてウエハ上で 25 mm）の領域が照明光 I L が照射可能な有効照射領域 I A F となっている。この有効照射領域 I A F の X 軸方向の両端部（斜線部の領域）に前述した一対の R A 顕微鏡 28 により、観察可能なレチクルアライメントマーク（不図示）が形成されている。

また、有効照射領域 I A F の X 軸方向中心の Y 軸方向両端部には、約 1 mm 角の他マーク禁止領域のガラス部分（抜き領域）を設け、該抜き領域の内部にクロム等により回転調整マーク  $P M \theta_1$ 、 $P M \theta_2$  が形成されている。また、有効照射領域 I A F の Y 軸方向のほぼ中央部には、X 軸方向に沿って所定間隔、例えば 4 mm 間隔（投影倍率が 1 / 4 倍としてウエハ上で 1 mm 間隔）で複数の A I S マークブロック 62<sub>1</sub> が配置されている。また、これらの 4 mm 間隔で配置された A I S マークブロック 62<sub>1</sub> の他、多点焦点位置検出系（60 a, 60 b）の結像光束の照射点に対応する投影光学系 P L の有効視野内の検出点に位置決め可能な位置にも、A I S マークブロック 62<sub>2</sub> が配置されている。このため、本実施形態では、例えば投影光学系 P L の像面形状の計測や、多点焦点位置検出系（60 a, 60 b）の各センサの出力に対するオフセット設

定や原点位置（検出基準位置）の再設定等のキャリブレーションのための計測を、空間像計測により行う際に、スリット板90のスリット22中心で投影光学系PLの光軸方向位置（Z位置）を計測することが可能となる。従って、スリット板90の面精度の設定を緩やかにすることができる。なお、以下においては、特に必要な場合を除き、AISマークブロック62<sub>1</sub>、AISマークブロック62<sub>2</sub>を、特に区別することなく、AISマークブロック62と表示する。

レチクルマーク板RFMでは、AISマークブロック62は、走査方向（Y軸方向）には、1行しか設けられていないが、投影光学系PLのスキャン方向の各点を検出点として空間像計測を行う場合には、レチクルステージRSTを移動して行えば良い。

次に、各AISマークブロック62内のマーク配置の一例について図8に基づいて説明する。図8には、AISマークブロック62が拡大して示されている。この図8に示されるように、AISマークブロック62内には、ネガ型アライメントマーク・サブブロック63a<sub>1</sub>、63a<sub>2</sub>、ポジ型アライメントマーク・サブブロック63b<sub>1</sub>、63b<sub>2</sub>、ネガ型ラインアンドスペースマーク・サブブロック64a、ポジ型ラインアンドスペースマーク・サブブロック64b、ネガ型シーケンシャルコママーク・サブブロック65a<sub>1</sub>、65a<sub>2</sub>、ポジ型シーケンシャルコママーク・サブブロック65b<sub>1</sub>、65b<sub>2</sub>、ネガ型1次元ボックスマーク・サブブロック66a<sub>1</sub>、66a<sub>2</sub>、ポジ型1次元ボックスマーク・サブブロック66b<sub>1</sub>、66b<sub>2</sub>、ネガ型追加マーク・サブブロック67a、ポジ型追加マーク・サブブロック67b等が設けられている。なお、以下においては、ラインアンドスペースは、L/Sと略述する。

前記ネガ型L/Sマーク・サブブロック64a内には、例えば線幅0.4μm～4.0μmまでのデューティ比1：1のL/Sマークから成るネガマークPM<sub>1</sub>が配置されている。ここで、ネガマークとは、クロム層に形成された開



ロパターンから成るマークを意味する。この他、このネガ型L/Sマーク・サブブロック64a内には、応用計測マークとして線幅異常測定用のネガマークPM<sub>2</sub>も配置されている。この線幅異常測定用のネガマークPM<sub>2</sub>は、例えば線幅0.4μm~0.8μmのデューティ比1:1のL/Sマークが80μmピッチで並んでいるネガマークである。各L/Sマークとしては、周期方向がX軸方向のものとY軸方向のものとが設けられている。本明細書において、L/Sパターンについて、ライン部の幅とピッチ（周期）との比についてデューティ比という用語を用いる場合は、パーセント（%）で示し、ライン部の幅とスペース部の幅との比についてデューティ比という用語を用いる場合は、その比率（例えば1:1）で示すものとする。

前記ネガ型シーケンシャルコママーク・サブブロック65a<sub>1</sub>内には、周期方向をX軸方向とする異なる線幅のデューティ比1:1のL/Sマークから成るネガマークPM<sub>3</sub>が一定間隔で配置されている。ネガ型シーケンシャルコママーク・サブブロック65a<sub>2</sub>内には、周期方向をY軸方向とする異なる線幅のデューティ比1:1のL/Sマークから成るネガマークPM<sub>4</sub>が一定間隔で配置されている。

前記ネガ型1次元ボックスマーク・サブブロック66a<sub>1</sub>内には、例えば線幅40μm程度の太いラインパターンと、例えば線幅0.4~0.56μm程度の細いラインパターンがX軸方向に所定間隔（例えば、40μm程度）で並んだ1次元マークから成るネガマークPM<sub>5</sub>が配置されている。また、前記ネガ型1次元ボックスマーク・サブブロック66a<sub>2</sub>内には、マークPM<sub>5</sub>と同様に構成され配列方向をY軸方向とするネガマークPM<sub>6</sub>が配置されている。

前記ネガ追加マーク・サブブロック67a内には、いろいろな線幅のデューティ比が1:1以外のL/Sマーク、例えばデューティ比1:9以上の擬似孤立線マークPM<sub>7</sub>や、楔型マーク（SMPマーク）PM<sub>8</sub>、その他孤立線等のネガマークが配置されている。これらのマークPM<sub>7</sub>、PM<sub>8</sub>も配列方向がX軸方

向のものとY軸方向のものとが設けられている。

前記ネガ型アライメントマーク・サブブロック63 a<sub>1</sub>内には、例えば配列方向がX軸方向の線幅24 μmのデューティ比1 : 1のL/Sマークから成るネガマーク（FIAマーク）PM<sub>9</sub>が配置されている。また、ネガ型アライメントマーク・サブブロック63 a<sub>2</sub>内には、例えば配列方向がY軸方向の線幅24 μmのデューティ比1 : 1のL/Sマークから成るネガマーク（FIAマーク）PM<sub>10</sub>が配置されている。

前記ポジ型L/Sマーク・サブブロック64 b内には、例えば線幅0.4 μm～4.0 μmまでのデューティ比1 : 1のL/Sマークから成るポジマークPM<sub>11</sub>が配置されている。ここで、ポジマークとは、所定面積の他マーク禁止領域のガラス部分（抜き領域）内にクロム等のパターンで形成されたマークを意味する。この他、このポジ型L/Sマーク・サブブロック64 b内には、応用計測マークとして線幅異常測定用のポジマークPM<sub>12</sub>も配置されている。各L/Sマークとしては、周期方向がX軸方向のものとY軸方向のものとが設けられている。

前記ポジ型シーケンシャルコママーク・サブブロック65 b<sub>1</sub>内には、周期方向をX軸方向とする異なる線幅のデューティ比1 : 1のL/Sマークから成るポジマークPM<sub>13</sub>が一定間隔で配置されている。ポジ型シーケンシャルコママーク・サブブロック65 b<sub>2</sub>内には、周期方向をY軸方向とする異なる線幅のデューティ比1 : 1のL/Sマークから成るポジマークPM<sub>14</sub>が一定間隔で配置されている。

前記ポジ型1次元ボックスマーク・サブブロック66 b<sub>1</sub>内には、例えば線幅40 μm程度の太いラインパターンと、例えば線幅0.4～0.56 μm程度の細かいラインパターンがX軸方向に所定間隔（例えば、40 μm程度）で並んだ1次元マークから成るポジマークPM<sub>15</sub>が配置されている。また、前記ポジ型1次元ボックスマーク・サブブロック66 b<sub>2</sub>内には、マークPM<sub>15</sub>と同

様に構成され配列方向をY軸方向とするポジマーク $PM_{16}$ が配置されている。

前記ポジ型追加マーク・サブブロック67b内には、いろいろな線幅のデューティ比が1:1以外のL/Sマーク、例えばデューティ比1:9以上の擬似孤立線マーク $PM_{17}$ や、楔型マーク（SMPマーク） $PM_{18}$ 、その他孤立線等のポジマークが配置されている。これらのマーク $PM_{17}$ 、 $PM_{18}$ 等も配列方向がX軸方向のものとY軸方向のものとが設けられている。

前記ポジ型アライメントマーク・サブブロック63b<sub>1</sub>内には、例えば配列方向がX軸方向の線幅24 $\mu$ mのデューティ比1:1のL/Sマークから成るポジマーク（FIAマーク） $PM_{19}$ が配置されている。また、ポジ型アライメントマーク・サブブロック63b<sub>2</sub>内には、例えば配列方向がY軸方向の線幅24 $\mu$ mのデューティ比1:1のL/Sマークから成るポジマーク（FIAマーク） $PM_{20}$ が配置されている。

この他、AISマークブロック62内には、120 $\mu$ m角（投影倍率1/4でウエハ面上では30 $\mu$ m角）の正方形マークから成るネガマーク（BOXマーク） $PM_{21}$ 、Line in Box マーク $PM_{22}$ （これについては更に後述する）なども配置されている。

ここで、空間像計測器59を用いた空間像計測の方法について簡単に説明する。前提としてスリット板90には、例えば図9Aに示されるように、X軸方向に伸びる所定幅2Dのスリット22が形成されているものとする。

空間像の計測に当たり、主制御装置20により、可動レチクルブラインド12が不図示のブラインド駆動装置を介して駆動され、図2に示されるように、レチクルマーク板RFM（又はレチクルR）に対する照明光ILの照明領域が計測マークPMを含む所定領域のみに制限される。ここで、計測マークPMとしては、Y軸方向に周期性を有するデューティ比1:1のL/Sマーク、例えば前述したマーク $PM_1$ などが用いられるものとする。

この状態で、照明光ILがレチクルマーク板RFMに照射されると、図2に

示されるように、計測マークPMによって回折、散乱した光（照明光IL）は投影光学系PLにより屈折され、該投影光学系PLの像面に計測マークPMの空間像（投影像）PM'が形成される。このとき、ウエハステージWSTは、空間像計測器59のスリット板90上のスリット22の+Y側（又は-Y側）に前記空間像PM'が形成される位置に設定されているものとする。このときのスリット板90の平面図が図9Aに示されている。

そして、主制御装置20により、ウエハステージ駆動系を介してウエハステージWSTが図9A中に矢印Fで示されるように+Y方向に駆動されると、スリット22が空間像PM'に対してY軸方向に走査される。この走査中に、スリット22を通過する光（照明光IL）がウエハステージWST内の光導出部、ミラーM、受光レンズ89（図4の場合は、レンズ84、86）を介して光センサ24で受光され、その光電変換信号が信号処理回路42を介して主制御装置20に供給される。主制御装置20では、その光電変換信号に基づいて空間像PM'に対応する光強度分布を計測する。

図9Bには、上記の空間像計測の際に得られる光電変換信号（光強度信号）Pの一例が示されている。

この場合、空間像PM'はスリット22の走査方向（Y軸方向）の幅（2D）の影響で像が平均化する。

従って、スリットを $p(y)$ 、空間像の強度分布を $i(y)$ 、観測される光強度信号を $m(y)$ とすると、空間像の強度分布 $i(y)$ と観測される強度信号 $m(y)$ の関係は次の(1)式で表すことができる。この(1)式において、強度分布 $i(y)$ 、強度信号 $m(y)$ の単位は単位長さ当たりの強度とする。

$$m(y) = \int_{-\infty}^{\infty} p(y-u) \cdot i(u) du \quad \cdots(1)$$

$$p(y) = \begin{cases} 1 & (|y| \leq D) \\ 0 & (|y| > D) \end{cases} \quad \dots(2)$$

すなわち、観測される強度信号  $m(y)$  はスリット  $p(y)$  と空間像の強度分布  $i(y)$  のコンボリューションになる。

従って、計測精度の面からは、スリットの走査方向の幅（以下、単に「スリット幅」と呼ぶ） $2D$  は小さい程良い。

発明者（萩原）は、スリット幅  $2D$  を、照明光  $IL$  の波長  $\lambda$ 、投影光学系  $PL$  の開口数  $N.A.$  の関数  $f(\lambda/N.A.)$  として、種々のシミュレーション及び実験等を繰り返し行った。その結果、スリット幅  $2D = n \cdot (\lambda/N.A.)$  とし、かつ係数  $n \leq 1$  とした場合に、十分に実用的であり、特に  $n \leq 0.8$  であればより実用的であることが確認された。ここで、実用的であるとは、空間像→空間像強度信号の変換の際に像プロファイルの劣化が少なく、光センサ 24（光電変換素子）以降の信号処理系には大きなダイナミックレンジが不要となり十分な精度が得られることを意味する。

上記の良好な結果の一例を示せば、例えば、次の表 1 のようになる。

【表 1】

波長(nm)	投影レンズの開口数	(A)波長/投影レンズの開口数	B=A×0.8
248	0.68	364	291
248	0.75	331	264
193	0.65	297	238
193	0.75	257	206
193	0.85	227	182

上記表 1 からわかるように、開口数、波長によって十分なスリット幅（開口サイズ：表 1 中の B）は異なるが、概略 300 nm 以下が適切な値である。この程度のスリットは市販のクロムレチクル（マスクブランクスとも呼ばれる）を用いて製作可能である。

クロムレチクルは、通常 100 nm 程度の膜厚のクロム膜が石英基板に蒸着されている。石英基板は、2.286 mm、3.048 mm、4.572 mm、6.35 mm 厚のものが標準的である。

上述の如く、スリット幅2Dは、小さいほど良く、本実施形態のようにフォト・マルチプライヤ・チューブ(PMT)を光センサ24として用いる場合には、スリット幅が非常に小さくなっても走査速度を遅くして計測に時間を掛ければ光量(光強度)の検出は可能である。しかしながら、現実には、スループットの面から空間像計測時の走査速度には、一定の制約があるため、スリット幅2Dがあまりにも小さいと、スリット22を透過する光量が小さくなり過ぎて、計測が困難となってしまう。

発明者(萩原)がシミュレーション及び実験等により得た知見によれば、スリット幅2Dの最適値は、露光装置の解像限界ピッチ(L/Sパターンのピッチ)の半分程度となることが確認された。これについては、後で更に詳述する。

これまでの説明から明らかなように、本実施形態では、照明系10、空間像計測器59(スリット板90及び光センサ24を含む)、ウエハステージWST及び主制御装置20によって空間像計測装置が構成されている。また、この内、主制御装置20によって、空間像計測装置の一部を成す処理装置が構成されている。

上述した空間像計測装置及び空間像計測方法は、a. ベストフォーカス位置の検出、b. パターン像の結像位置の検出、c. アライメント系ALG1のベースライン計測等に用いられる。

以下においては、空間像計測器59を構成するスリット板90上には、図10に示されるように、X軸方向に伸びる所定幅2D、長さLのスリット22aと、Y軸方向に伸びる所定幅2D、長さLのスリット22bとが形成されているものとする。ここで、2Dは例えば $0.3\mu\text{m}$ であり、Lは例えば $16\mu\text{m}$ である。また、スリット22bはスリット22aの-X側に約 $4\mu\text{m}$ かつ+Y側に約 $4\mu\text{m}$ 隔てて配置されている。また、ウエハステージWSTの内部の光導出部、ミラーM及び受光レンズを介して光センサ24によりスリット22a

、22bのいずれを透過した光をも受光が可能になっているものとする。なお、以下では、特に必要が無い限り、スリット22a、22bを区別することなくスリット22と呼ぶ。

本実施形態の露光装置100におけるc. ベースライン計測については既に説明したので、以下、上記a. ベストフォーカス位置の検出及びb. パターン像の結像位置の検出について、実施例を交えながら説明する。

#### 〈ベストフォーカス位置の検出〉

このベストフォーカス位置の検出は、例えばA. 投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出及び最良結像面（像面）の検出、並びにB. 球面収差測定などの目的に用いられる。

図11～図16には、ライン幅 $0.2\mu\text{m}$ 、デューティ比50%のL/Sマークの空間像を前述した空間像計測方法により計測した場合に対応する結像シミュレーションの結果が示されている。このシミュレーションの条件は、照明光の波長 $248\text{nm}$ 、投影光学系の $N.A.=0.68$ 、照明のコヒーレンスファクタ $\sigma=0.85$ で、スリット幅 $2D=0.3\mu\text{m}$ である。この条件は、表1のBの条件に近い。なお、図11～図16において、横軸はスリットのY位置（ $\mu\text{m}$ ）を示し、縦軸は光強度（エネルギー値）を示す。

図11は、ベストフォーカス位置でのシミュレーション結果を示す。この図11において、実線で示される波形P2は $0.2\mu\text{m}$ L/Sの空間像で（1）式の $i(y)$ に相当し、点線で示される波形P3がスリットの走査（空間像計測）によって得られる光強度信号で（1）式の $m(y)$ に相当する。

図12は図11の強度信号P3、すなわち $m(y)$ をフーリエ変換した際の空間周波数成分を、元の強度信号P3とともに示す。図12において、破線で示される波形P4は0次周波数成分を、一点鎖線で示される波形P5は1次周波数成分を、二点鎖線で示される波形P6は2次周波数成分を、実線で示される波形P7は3次周波数成分を、それぞれ示す。なお、図12では、P4～P

7は、識別を容易にするため、1.0だけ嵩上げして示されている。

図13はベストフォーカス位置から0.2  $\mu\text{m}$ デフォーカスした場合のシミュレーション結果を示す。この図13において、実線で示される波形P2は0.2  $\mu\text{m}$  L/Sの空間像で(1)式の $i(y)$ に相当し、点線で示される波形P3がスリットの走査(空間像計測)によって得られる光強度信号で(1)式の $m(y)$ に相当する。

図14は図13の強度信号P3をフーリエ変換した際の空間周波数成分を、元の強度信号P3とともに示す。図14において、破線で示される波形P4は0次周波数成分を、一点鎖線で示される波形P5は1次周波数成分を、二点鎖線で示される波形P6は2次周波数成分を、実線で示される波形P7は3次周波数成分を、それぞれ示す。なお、図14では、P4~P7は、識別を容易にするため、1.0だけ嵩上げして示されている。

図15はベストフォーカス位置から0.3  $\mu\text{m}$ デフォーカスした場合のシミュレーション結果を示す。この図15において、実線で示される波形P2は0.2  $\mu\text{m}$  L/Sの空間像で(1)式の $i(y)$ に相当し、点線で示される波形P3がスリットの走査(空間像計測)によって得られる光強度信号で(1)式の $m(y)$ に相当する。

図16は図15の強度信号P3をフーリエ変換した際の空間周波数成分を、元の強度信号P3とともに示す。図16において、破線で示される波形P4は0次周波数成分を、一点鎖線で示される波形P5は1次周波数成分を、二点鎖線で示される波形P6は2次周波数成分を、実線で示される波形P7は3次周波数成分を、それぞれ示す。なお、図16では、P4~P7は、識別を容易にするため、1.0だけ嵩上げして示されている。

図11と図13とを比較するとわかるように、0.2  $\mu\text{m}$ のデフォーカスによって明らかに像の形状が崩れている。また、図13と図15とを比較すると、デフォーカス量の増大に伴って明らかに像の形状がさらに崩れていることが



わかる。

また、上述のように、光強度信号  $P_3$  を周波数成分に分離すると、いろいろな信号処理が容易に行える。例えば、1次周波数成分  $P_5$  と0次周波数成分  $P_4$  との振幅比、すなわち（1次／0次）の振幅比であるコントラストに着目してみると、図12に示されるベストフォーカス位置の場合のコントラストは、0.43である。また、図14に示されるベストフォーカス位置から  $0.2\mu\text{m}$  デフォーカスした場合のコントラストは、0.24である。また、図16に示されるベストフォーカス位置から  $0.3\mu\text{m}$  デフォーカスした場合のコントラストは、0.047である。

このように、（1次／0次）の振幅比であるコントラストは、フォーカス位置によって敏感に変化するので強度信号からベストフォーカス位置を決定するのに便利である。すなわち、ベストフォーカス位置は（1次／0次）の振幅比であるコントラストが最大となるフォーカス位置を求めることによって検出可能である。

そこで、本実施形態では、次のようにして投影光学系 PL のベストフォーカス位置の検出を行う。

このベストフォーカス位置の検出には、レチクルマーク板 RFM 上（又はレチクル R 上）のデューティ比 1 : 1 の L / S マーク、例えばレチクルマーク板 RFM の X 軸方向中心に位置する AIS マークブロック 62<sub>1</sub> 内の線幅  $0.8\mu\text{m}$ （ウエハ上でライン幅  $0.2\mu\text{m}$ ）の L / S ネガマーク PM<sub>1</sub> が、計測マーク PM として用いられる。このベストフォーカス位置の検出は、上述したシミュレーションと全く同じ条件の下で行われるものとする。

まず、主制御装置 20 では、投影光学系 PL の有効視野（照明領域 IAR に対応）内でベストフォーカス位置を計測すべき所定点（ここでは、投影光学系 PL の光軸上）にレチクルマーク板 RFM 上の計測マーク PM を位置決めすべく、レチクルステージ RST を移動する。

なお、レチクルR上のマークの空間像計測を行う場合には、まず、不図示のレチクルローダにより、レチクルステージRST上にレチクルRがロードされる。次に、主制御装置20では、レチクルR上の計測マークPMが、投影光学系PLの光軸上にほぼ一致するように、レチクルステージRSTを移動する。

次に、主制御装置20では、照明光ILが計測マークPM部分を含む所定領域のみに照射されるように可動レチクルブラインド12を駆動制御して照明領域を制限する。この状態で、主制御装置20では、照明光ILを計測マークPMに照射して、前述と同様にして、ウエハステージWSTをY軸方向に走査しながら計測マークPMの空間像計測を前述と同様にスリットスキャン方式により行う。

主制御装置20では、この空間像計測を、スリット板90のZ軸方向の位置（すなわち、ウエハステージWSTのZ位置）を所定ステップで変更しながら、複数回繰り返し、各回の光強度信号（光電変換信号）をメモリに記憶する。

そして、主制御装置20では、前記繰り返しにより得られた複数の光強度信号（光電変換信号）それぞれに基づいて得られる所定の評価量、例えば複数の光強度信号をそれぞれフーリエ変換した1次周波数成分と0次周波数成分の振幅比であるコントラストを求める。そして、主制御装置20では、そのコントラストが最大となる光強度信号に対応するウエハステージWSTのZ位置（すなわち、スリット板90のZ軸方向の位置）を検出し、この位置を投影光学系PLのベストフォーカス位置として決定する。前述の如く、コントラストは、フォーカス位置（デフォーカス量）に応じて敏感に変化するので、投影光学系PLのベストフォーカス位置を精度良く、かつ容易に計測（決定）することができる。

なお、2次以上の高次の次数の周波数成分の振幅は一般に小さく、電氣的なノイズ、光学的なノイズに対する振幅が十分に取れない場合もあるが、S/N（シグナル／ノイズ）比の点で問題がない場合には高次の周波数成分の振幅比

の変化を観測してもベストフォーカス位置を求めることができる。計測マークであるL/Sマークはライン幅とスペース幅が等しいデューティ比1:1のパターンであることが望ましいが、それ以外のデューティ比のマークを用いることも可能である。発明者（萩原）が実験等の結果得た知見によれば、L/Sマークのラインパターンの配列周期、すなわちマークピッチ $P_M$ は、次の(3)式程度である場合に良好な結果が得られることが判明した。

$$P_M = \lambda / N \cdot A \cdot \times (1 \sim 1.2) \quad \dots (3)$$

なお、上述した評価量としては、コントラストの他、波高値、マークピッチを周期とする正弦波の振幅又は面積比などや、光強度信号 $P$ （(1)式の $m(y)$ ）の微分値が最大となるZ位置（フォーカス位置）なども用いることができる。いずれにしても、それらの評価量のピークのスリット板90のZ軸方向の位置（Z座標）を、ベストフォーカス位置として決定することができる。

上述したコントラストと同様に、波高値、マークピッチを周期とする正弦波の振幅又は面積比などは、フォーカス位置（デフォーカス量）に応じて変化するので、投影光学系PLのベストフォーカス位置を精度良く、かつ容易に計測（決定）することができる。

なお、ベストフォーカス位置の計測に用いられる計測マークとしては、上述したデューティ比1:1のL/Sマークの他、孤立線又はピッチを線幅の10倍程度とした疑似孤立線、例えば前述したマーク $PM_7$ などを用いることができる。

なお、ベストフォーカス位置の検出の具体例については、更に後述する。

また、投影光学系PLの像面形状の検出は、次のようにして行うことができる。

初めに、レチクルマーク板RFMを用いる場合について説明する。この場合、まず、主制御装置20では、投影光学系PLの有効視野内の複数点に、レチクルマーク板RFM上の各AISマークブロック62内の例えば計測マークP

$M_1$ が配置されるようにレチクルステージRSTを移動する。

次に、主制御装置20では、各点の計測マーク $PM_1$ を含む所定領域のみに照明光ILが照射されるように可動レチクルブラインド12によってその照明領域を制限して、各計測マーク $PM_1$ に照明光ILを順次照射して上記各点でのベストフォーカス位置の検出を前述と同様にして行い、その結果をメモリに記憶する。

次いで、主制御装置20では、投影光学系PLの有効視野内の別の複数点に、レチクルマーク板RFM上の各AISマークブロック62内の例えば計測マーク $PM_1$ が配置されるようにレチクルステージRSTを移動して、上記各点でのベストフォーカス位置の検出を前述と同様にして行い、その結果をメモリに記憶する。

そして、主制御装置20では、得られた各ベストフォーカス位置に基づいて、所定の統計的処理を行うことにより、投影光学系PLの像面形状を算出する。このとき、像面形状とは別に像面湾曲をも算出しても良い。なお、像面形状の計測に当たって、複数の計測マークを必ずしも用いる必要はなく、例えば単一の計測マークを投影光学系PLの有効視野内の複数の検出点に順次移動させつつ、上記のベストフォーカス位置の計測を繰り返しおこなっても良い。

また、レチクルを用いて像面形状を検出する場合には、一例として図17に示されるように、パターン領域PA内に、前述した計測マークPMと同一寸法同一周期の計測マーク $RM_1 \sim RM_n$ が形成された計測用レチクルR1が用いられる。

まず、不図示のレチクルローダにより、レチクルステージRST上にレチクルR1がロードされる。次に、主制御装置20では、レチクルR1の中央に存在する計測マーク $RM_k$ が、投影光学系PLの光軸上にほぼ一致するように、レチクルステージRSTを移動する。次に、主制御装置20では、照明光ILが計測マーク $RM_1$ 部分のみに照射されるように可動レチクルブラインド12

を駆動制御して照明領域を規定する。この状態で、主制御装置 20 では、照明光  $I_L$  をレチクル R1 に照射して、前述と同様に、スリットスキャン方式により空間像計測器 59 を用いて計測マーク  $RM_1$  の空間像計測及び投影光学系 PL のベストフォーカス位置の検出を行い、その結果を内部メモリに記憶する。

計測マーク  $RM_1$  を用いたベストフォーカス位置の検出が終了すると、主制御装置 20 では、照明光  $I_L$  が計測マーク  $RM_2$  部分のみに照射されるように可動レチクルブラインド 12 を駆動制御して照明領域を規定する。この状態で、上記と同様に、スリットスキャン方式で計測マーク  $RM_2$  の空間像計測及び投影光学系 PL のベストフォーカス位置の検出を行い、その結果を内部メモリに記憶する。

以後、主制御装置 20 では、上記と同様に、照明領域を変更しつつ、計測マーク  $RM_3 \sim RM_n$  について空間像の計測及び投影光学系 PL のベストフォーカス位置の検出を繰り返し行う。

これにより得られた各ベストフォーカス位置  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  に基づいて、所定の統計的処理を行うことにより、投影光学系 PL の像面形状を算出する。

投影光学系 PL の像面、すなわち、最良結像面は、光軸からの距離が異なる無数の点（すなわち、いわゆる像の高さが異なる無数の点）におけるベストフォーカス点の集合から成る面であるから、上述したような手法により、像面形状を容易にかつ正確に求めることができる。

なお、計測マーク PM として、X 軸方向（又はサジタル方向）と Y 軸方向（又はメリジオナル方向）とにそれぞれ同一ピッチで配列される 2 つの L/S パターンを用い、投影光学系 PL の視野内の所定点でその 2 つの L/S パターンに照明光  $I_L$  を順次照射して上述したベストフォーカス位置の検出を行なうことで投影光学系 PL の非点収差を計測することもできる。

以上により、前述したA. 投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出及び最良結像面（像面）の検出を行うことができる。

また、投影光学系PLの球面収差の検出は、次のようにして行うことができる。

まず、レチクルマーク板RFMを用いる場合について説明する。この場合、この球面収差の検出に際しては、例えば、レチクルマーク板RFMのX軸方向中心に位置するAISマークブロック62<sub>1</sub>内に、Y軸方向に所定距離隔てて配置された同一ライン幅で周期の異なる複数、例えば2つのY軸方向のL/Sマーク、具体的にはライン幅1 $\mu$ mで周期が2 $\mu$ mのY軸方向の第1のL/Sマーク、ライン幅1 $\mu$ mで周期が4 $\mu$ mのY軸方向の第2のL/Sマークが計測マークPMとして用いられる。

まず、主制御装置20では、例えば第1のL/Sマークを投影光学系PLの光軸上に位置決めするため、レチクルステージRSTを移動する。そして、その光軸上に位置決めされた第1のL/Sマークの近傍のみに可動レチクルブラインド12を用いて照明領域を設定して、その第1のL/Sマークについて、上述したベストフォーカス位置の検出を行い、その結果をメモリに記憶する。

次に、主制御装置20では、第2のL/Sマークが照明光により照明される位置まで、レチクルステージRSTを移動し、その第2のL/Sマークについて、上述したベストフォーカス位置の検出を行い、その結果をメモリに記憶する。

そして、主制御装置20では、このようにして得られ、メモリ内に記憶されている各計測マークについてのベストフォーカス位置の差に基づいて、所定の演算を行うことにより、球面収差を求める。

また、レチクルを用いて球面収差の検出を行う場合には、例えば、図18に示されるようにパターン領域PA内のX軸方向のほぼ中央に、Y軸方向に所定距離隔てて2つの計測マークPM1、PM2が形成された計測用レチクルR2

が用いられる。計測マークPM1は、前述した第1のL/Sマークと同一寸法同一周期のL/Sパターンである。また、計測マークPM2は、計測マークPM1と同一寸法のラインパターンが異なる周期（例えば、計測マークPM1の周期（マークピッチ）の1.5～2倍程度）でY軸方向に並んだL/Sパターンである。

まず、不図示のレチクルローダにより、レチクルステージRST上にレチクルR2がロードされる。次に、主制御装置20では、レチクルR2上の計測マークPM1が、投影光学系PLの光軸上にほぼ一致するように、レチクルステージRSTを移動する。次に、主制御装置20では、照明光ILが計測マークPM1部分のみに照射されるように可動レチクルブラインド12を駆動制御して照明領域を規定する。この状態で、主制御装置20では、照明光ILをレチクルR2に照射して、前述と同様に、スリットスキャン方式により空間像計測器59を用いて計測マークPM1の空間像計測及び投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出を行い、その結果を内部メモリに記憶する。

計測マークPM1を用いたベストフォーカス位置の検出が終了すると、主制御装置20では、照明光ILが計測マークPM2部分に照射されるようにレチクルステージRSTを+X方向に所定距離移動する。この状態で、上記と同様に、スリットスキャン方式で計測マークPM2の空間像計測及び投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出を行い、その結果を内部メモリに記憶する。

これにより得られた各ベストフォーカス位置 $Z_1$ と $Z_2$ との差に基づいて、投影光学系PLの球面収差を演算により算出する。

球面収差は、光学系の開口収差の1つであり、光軸上の物点からの種々の開口を持った光線束が光学系に入射したとき、その対応した像点が1点に結像しない現象である。従って、投影光学系の光軸におけるベストフォーカス位置の検出を、異なるピッチの複数のL/Sパターンについて繰り返し行い、各パターンに対応するベストフォーカス位置の差に基づいて演算により球面収差を簡

単に求めることができる。なお、この場合のベストフォーカス位置の差の測定精度は  $3\sigma < 20\text{ nm}$  程度であることが実用上は必要である。

#### 〈パターン像の結像位置の検出〉

パターン像の結像位置の検出は、C. 投影光学系の倍率及びディストーション測定、D. 投影光学系のコマ収差測定、E. 投影光学系のテレセントリシティ（照明テレセン）測定のそれぞれの目的で行われる。

計測マーク（計測対象となるマーク）は目的によって様々である。分類すると次の表2のようになる。ここで、空間像計測に基づく、投影光学系の結像特性の計測結果は、前述した焼き付け法による結像特性の計測結果と基本的に一致することが望ましいので、表2では、焼き付け計測マークとともに空間像計測マークが示されている。

【表2】

目的	焼き付け測定用マーク	空間像計測用マーク
C投影レンズ倍率・ディストーション測定	Box in Box Mark 、 大L/Sマーク	Box in Box Mark 、 大L/Sマーク
D投影レンズコマ収差測定	Line in Box Mark 、 L/Sマーク	Line in Box Mark 、 L/Sマーク、大小L/Sマーク
E照明テレセン測定	Box in Box Mark 、 大L/Sマーク	Box in Box Mark 、 大L/Sマーク

次に、投影光学系PLの倍率及びディストーション測定について説明する。

まず、レチクルマーク板RFMを用いる場合について説明する。この投影光学系PLの倍率及びディストーション測定に際しては、前述したレチクルマーク板RFM上の各AISマークブロック62内の  $120\text{ }\mu\text{m}$  角（投影倍率  $1/4$  でウエハ面上では  $30\text{ }\mu\text{m}$  角）のBOXマーク  $\text{PM}_{21}$  が計測マークPMとして用いられる。

まず、主制御装置20では、投影光学系PLの有効視野内の複数点にそれぞれ計測マーク  $\text{PM}_{21}$  が配置されるように、レチクルステージRSTを移動する。

次に、主制御装置20では、照明光ILが投影光学系PLの有効視野内の第



1 番目の検出点に位置する計測マーク  $PM_{21}$  を含む所定の領域部分のみに照射されるように可動レチクルブラインド 12 を制御して照明領域を制限する。この状態で、主制御装置 20 では、照明光  $IL$  を計測マーク  $PM_{21}$  に照射する。これにより、図 19 に示されるように、計測マーク  $PM_{21}$  の空間像  $PM_{21}'$ 、すなわちほぼ  $30\mu$  角の正形状のパターン像が形成される。

そして、主制御装置 20 では、この空間像  $PM_{21}'$  に対して、スリット板 90 上のスリット 22a が、Y 軸方向に走査されるようにウエハステージ  $WST$  を矢印 A 方向に駆動してスリットスキャン方式で空間像計測を行い、その計測により得られた光強度信号  $m(y)$  をメモリに記憶する。次に、主制御装置 20 では、得られた光強度信号  $m(y)$  に基づき、例えば公知の位相検出の手法により、計測マーク  $PM_{21}$  の空間像  $PM_{21}'$  の結像位置を求める。ここで、この位相検出の手法としては、例えば、光強度信号  $m(y)$  をフーリエ変換して得られる 1 次周波数成分（これは、正弦波とみなせる）とこれと同一周波数の基準となる正弦波との積の例えば 1 周期分の和を求めるとともに、前記 1 次周波数成分とこれと同一周期の基準となる余弦波との積の例えば 1 周期分の和を求める。そして、得られた和同士を除算して得られた商の逆正接（アークタンジェント）を求めることにより、1 次周波数成分の基準信号に対する位相差を求め、この位相差に基づいての空間像  $PM_{21}'$  の結像位置の Y 座標値を求めるという一般的な方法を用いることができる。

次に、主制御装置 20 では、空間像  $PM_{21}'$  に対して、スリット板 90 上のスリット 22b が、X 軸方向に走査されるようにウエハステージ  $WST$  を駆動してスリットスキャン方式で空間像計測を行い、その計測により得られた光強度信号  $m(x)$  をメモリに記憶する。そして、上記と同様の位相検出の手法により、空間像  $PM_{21}'$  の結像位置の X 座標値を求める。

同様に、主制御装置 20 では、投影光学系  $PL$  の有効視野内の第 2 番目以降の検出点にそれぞれ位置する計測マーク  $PM_{21}$  に対しても、計測マーク  $PM_{21}$

を含む所定領域のみに照明光  $I_L$  が照射されるように可動レチクルブラインド 12 によってその照明領域を制限して、各点毎に前述したスリットスキャン方式により空間像計測を行い、得られた各点での計測マークの結像位置 ( $X$ ,  $Y$  座標位置) を求める。そして、主制御装置 20 では、得られた各検出点についての計測マークの ( $X$ ,  $Y$  座標位置) に基づいて、投影光学系  $P_L$  の倍率及びディストーションの少なくとも一方を算出する。

一方、レチクルを用いて投影光学系  $P_L$  の倍率及びディストーションを測定するに際しては、例えば、図 20 に示されるように、パターン領域  $PA$  の中心部及び 4 角の部分に、合計 5 個の  $120\ \mu\text{m}$  角 (投影倍率  $1/4$  でウエハ面上では  $30\ \mu\text{m}$  角) の正方形マークから成る計測マーク  $BM_1 \sim BM_5$  が形成された計測用レチクル  $R_3$  が用いられる。

まず、不図示のレチクルローダにより、レチクルステージ  $RST$  上にレチクル  $R_3$  がロードされる。次に、主制御装置 20 では、レチクル  $R_3$  の中央に存在する計測マーク  $BM_1$  の中心が、投影光学系  $P_L$  の光軸上にほぼ一致するように、レチクルステージ  $RST$  を移動する。次に、主制御装置 20 では、照明光  $I_L$  が計測マーク  $BM_1$  を含む計測マーク  $BM_1$  より一回り大きい矩形領域部分のみに照射されるように可動レチクルブラインド 12 を駆動制御して照明領域を規定する。この状態で、主制御装置 20 では、照明光  $I_L$  をレチクル  $R_3$  に照射する。これにより、計測マーク  $BM_1$  の空間像が形成される。

この状態で、主制御装置 20 では、その計測マーク  $BM_1$  の空間像に対して、スリット板 90 上のスリット 22a が、 $Y$  軸方向に走査されるようにウエハステージ  $WST$  を駆動してスリットスキャン方式で空間像計測を行い、その光強度信号をメモリに記憶する。次いで、主制御装置 20 では、計測マーク  $BM_1$  の空間像に対して、スリット板 90 上のスリット 22b が、 $X$  軸方向に走査されるようにウエハステージ  $WST$  を駆動してスリットスキャン方式で空間像計測を行い、その光強度信号をメモリに記憶する。そして、主制御装置 20 で

は、得られた光強度信号に基づいて、前述と同様の位相検出の手法により、計測マーク  $BM_1$  の結像位置を求め、その座標値  $(x_1, y_1)$  に基づいて、レチクル  $R_3$  の光軸中心に対する位置ずれを補正する。

上記のレチクル  $R_3$  の位置ずれの補正が終了すると、主制御装置 20 では、照明光  $IL$  が計測マーク  $BM_2$  を含む計測マーク  $BM_2$  より一回り大きい矩形領域部分のみに照射されるように可動レチクルブラインド 12 を駆動制御して照明領域を規定する。この状態で、上記と同様に、スリットスキャン方式で計測マーク  $BM_2$  の空間像計測及びその  $XY$  位置の計測を行い、その結果を内部メモリに記憶する。

以後、主制御装置 20 では、上記と同様に、照明領域を変更しつつ、計測マーク  $BM_3 \sim BM_5$  について空間像の計測及び  $XY$  位置の計測を繰り返し行う。

これにより得られた計測マーク  $BM_2 \sim BM_5$  の座標値  $(x_2, y_2)$ 、 $(x_3, y_3)$ 、 $(x_4, y_4)$ 、 $(x_5, y_5)$  に基づいて、所定の演算を行うことにより、投影光学系  $PL$  の倍率及びディストーションの少なくとも一方を算出する。

ディストーションとは、イメージフィールド内の周辺で本来直線になるべきものが曲った像になる投影光学系  $PL$  の収差であり、このディストーションにより倍率誤差がある場合と同様にマーク像が像面上の所定の位置からずれて（横ずれして）結像される。

従って、上述した倍率及びディストーションの計測方法によると、投影光学系  $PL$  のイメージフィールド内の異なる位置に投影される各計測マークの空間像の位置ずれを、位相検出の手法により、それぞれ精度良く求めることができるので、結果的にディストーション及び倍率の少なくとも一方を精度良く計測することができる。

但し、単一の  $30\mu m$  角のマーク像  $PM_{21}'$ （又は計測マーク  $BM_n$  ( $n=1, 2, \dots, 5$ ) の像) をスリットスキャンしてもその像のエッジは 2 箇所しかなく、計測精度が十分得られない場合もある。このような場合は、コマ収差

の影響を受けることが殆ど無い程度の大きな $L/S$ マーク、例えば $4\mu m$ 以上のライン幅の $L/S$ マーク（この空間像は、ライン幅 $1\mu m$ の $L/S$ マーク像となる） $PM_1$ 等を計測マーク $PM$ として用いれば良い。図2-1には、このような計測マーク $PM$ の空間像計測を行う際に、スリット板90上にその計測マーク $PM$ の空間像 $PM'$ が形成された状態が示されている。

なお、上では、位相検出の手法により、計測マークの空間像の位置ずれを計測するものとしたが、これに限らず、前述と同様に、スリットスキャン方式の空間像計測を投影光学系 $PL$ のイメージフィールド内の異なる位置に投影される計測マーク（ $PM_{21}$ 、 $BM_n$ 又は $PM$ ）の空間像について繰り返し行い、その繰り返しにより得られた複数の光強度信号（光電変換信号）それぞれと所定のスライスレベルとの交点に基づいて各光電変換信号に対応する空間像の位置（エッジの位置）をそれぞれ算出し、該算出結果に基づいて投影光学系 $PL$ のディストーション及び倍率の少なくとも一方を求めることとしても良い。かかる場合には、スライス法を用いたエッジ検出の手法により、投影光学系 $PL$ のイメージフィールド内の異なる位置に投影される空間像の位置をそれぞれ精度良く求めることができ、結果的にディストーション及び倍率の少なくとも一方を精度良く計測することができる。この場合、設定されたスライスレベルで各光強度信号が2値化され、そのスライスレベルの設定が適切な場合には、例えば図1-1の波形 $P2$ と $P3$ との関係から想像できるように、焼き付けにより実際に得られるレジスト像のエッジ位置を計測するのと等価となる。

上述のように、投影光学系 $PL$ の有効視野内の複数の検出点に位置する複数の計測マークの結像位置（ $X$ 、 $Y$ 座標位置）から投影光学系 $PL$ のディストーションを計測する場合において、複数の検出点の内の任意の検出点を基準点とし、その基準点における計測マークの結像位置（ $X$ 、 $Y$ 座標位置）と、その基準点以外の点における計測マークの結像位置（ $X$ 、 $Y$ 座標位置）との $XY$ 面内の相対位置を検出し、その相対位置から投影光学系 $PL$ のディストーションを

求めることが望ましい。この場合には、基準点と基準点以外の検出点とに配置された計測マークを含む領域に可動ブラインド12により照明領域を順次変更して空間像計測及び計測マークの結像位置（X，Y座標位置）のXY面内の相対位置の検出を行えば良い。このようにすると、仮に、ウエハステージWST（スリット22a，22b）の位置を計測するウエハ干渉計31にドリフトなどが生じていたとしても、基準点における計測マークの結像位置（X，Y座標位置）の計測結果と、基準点以外の点における計測マークの結像位置（X，Y座標位置）の計測結果とに、上記ドリフト等に起因する同等の計測誤差が含まれる結果、上記の相対位置にはドリフトの影響が殆ど含まれないこととなる。従って、計測中の干渉計のドリフトなどの影響を最小限に抑えることができる。また、各検出点における計測の度毎に可動レチクルブラインド12により照明光の照射領域を制限するので、計測中の投影光学系PLへの照明光の入射量を抑制することができる。

ところで、現状の露光装置では、投影光学系のディストーション（倍率を含む）の管理は、基準ウエハを用いて次のようにして行われている。ここで、基準ウエハとは、投影光学系による露光領域内に30 $\mu$ m角の OUTER BOX マークを転写した後、現像工程を経てエッチングを行い、そのエッチング後に OUTER BOX マークのエッジの位置を光波干渉式座標測定器などで予め計測しておいたものである。そして、露光装置のディストーション計測時にはエッチングされた30 $\mu$ m角の OUTER BOX マークの中心に、10 $\mu$ m角の INNER BOX マークのレジスト像を焼き付け、相対位置をレジストレーション測定器などで計測する。

従って、ウエハ上（像面上）で10 $\mu$ m角の BOX マークの空間像をエッジ検出の手法により検出することにより、ディストーション計測を行えば、コマ収差の影響が基準ウエハを用いた上記のディストーション計測時と同等になり、相対的な差が発生しない。このため、上記の基準ウエハを用いたディストー

これを実現するために、前述したデバイスレチクルやレチクルマーク板に  $40\mu\text{m}$  角（ウエハ上  $10\mu\text{m}$  角）のインナーBOXマークを形成することが考えられる。しかるに、最近のCMPプロセスでは、ウエハ上  $10\mu\text{m}$  角のマークはディッシングが生じるために入れられない。

発明者（萩原）は、図 20 に示される計測用レチクル R 3 の計測マーク BM<sub>1</sub> ~ BM<sub>5</sub> に代えて、計測マークを Y 方向に関してストライプ状に細分化した擬似ボックスマークを形成した計測用レチクルを用いて、前述と同様の手順でエッジ検出の手法による投影光学系 PL のディストーション計測を行った結果、各計測マークの X 位置として、計測マーク BM<sub>n</sub> の X 位置と同等の値となることが確認された。これより、Y 方向に関して細分化された擬似ボックスマークと、X 方向に関して細分化された擬似ボックスマークとが形成された計測用レチクルなどを用意し、それぞれの計測マークをスリット 22 a, 22 b で相対走査することにより、ディストーション計測を行うことができる。

図 2 2 には、上述した Y 方向に関して細分化された擬似ボックスマークと、X 方向に関して細分化された擬似ボックスマークその他の計測マークが形成されたマークブロック（240  $\mu$ m 角、あるいは 300  $\mu$ m 角）の一例が示され

ている。この図22において、符号MM1, MM2は、例えば5本の $5\mu\text{mL}/\text{S}$ マークから成る倍率計測マークであり、符号MM3, MM4は、例えば29本の $1\mu\text{mL}/\text{S}$ マークから成るフォーカス計測マークであり、符号MM5, MM6は、例えば11本の $2.5\mu\text{mL}/\text{S}$ マークから成る擬似ボックスマークである。この図22のマークブロックは、例えばデバイスレチクルやレチクルマーク板に形成される。なお、擬似ボックスマークの細分化は、例えば $2\mu\text{mL}/\text{S}$ 程度（ウエハ上 $0.5\mu\text{mL}/\text{S}$ 程度）以下が望ましい。

次に、投影光学系のコマ収差の計測方法について説明する。コマ収差の計測は、 $L/\text{S}$ マークを計測マークとして用いる第1の方法と、Line in Box マークを計測マークとして用いる第2の方法とが代表的に挙げられる。

#### （第1の方法）

焼き付け法により、コマ収差を測定する場合に、解像限界付近の小 $L/\text{S}$ マーク像の線幅異常値を用いる方法が知られている。ここで、線幅異常値とは、焼き付けによって形成されるレジスト像の非対称の度合いを表す指標となる値である。例えば、図23に示される $0.2\mu\text{mL}/\text{S}$ マーク（設計値）のレジスト像を例にとって説明すると、線幅異常値Aは、両端のラインパターンの線幅 $L1$ 、 $L5$ を用いて、次の（4）式のように定義される。

$$A = \frac{L1 - L5}{L1 + L5} \quad \dots(4)$$

Aは通常3%未満が投影光学系（投影レンズ）に望まれる性能である。

空間像計測においてもこのような $L/\text{S}$ マーク像の線幅異常値を直接計測することが出来る。この場合は、スライス法によるエッジ検出の手法を用いれば良いが、スライスレベルの決定に当たって、空間像に対応する光強度信号を適当な閾値（スレッシュホールドレベル）で2値化し、レジスト像の線幅に近づけるという簡単なレジスト像シミュレーションを行うことにより、その閾値をスライスレベルとして決定することが望ましい。

以下、この線幅異常値の計測によるコマ収差の計測方法について説明する。

まず、レチクルマーク板 R F M を用いる場合について説明する。このコマ収差の計測には、レチクルマーク板 R F M の各 A I S マークブロック 6 2 内に配置された例えばライン幅  $0.8 \mu\text{m}$  (ウエハ面上で  $0.2 \mu\text{m}$ ) でデューティ比 1 : 1 の Y 軸方向に周期性を有する L / S ネガマークが計測マーク P M として用いられる。

この場合、主制御装置 2 0 では、前述した倍率・ディストーション計測の際と同様の手順で、投影光学系 P L の有効視野内の複数の検出点に配置された各計測マークの空間像を順次計測し、それぞれの光強度信号とスライスレベルとの交点をそれぞれ求め、その求められた交点の Y 座標 (又は X 座標) から空間像 P M' のそれぞれについて各ラインのライン幅を求め、このライン幅に基づいてそれぞれの線幅異常値を (4) 式に基づいて算出し、この算出結果に基づいて投影光学系 P L のコマ収差を求める。

一方、レチクルを用いてコマ収差の計測を行う場合には、例えば図 2 4 に示されるように、パターン領域 P A の中心と 4 角の部分の合計 5 箇所に計測マーク  $DM_1 \sim DM_5$  が形成された計測用レチクル R 4 が用いられる。計測マーク  $DM_1 \sim DM_5$  としては、ライン幅  $0.8 \mu\text{m}$  (ウエハ面上で  $0.2 \mu\text{m}$ ) でデューティ比 5 0 % の Y 軸方向に周期性を有する L / S パターンが用いられる。

この場合、主制御装置 2 0 では、前述した倍率・ディストーション計測の際と同様の手順で、レチクルアライメント、及び空間像計測を行って、計測マーク  $DM_2 \sim DM_5$  の空間像 ( $DM_2' \sim DM_5'$  とする) に対応する光強度信号  $m(y)$  を得る。

そして、この得られた各光強度信号  $m(y)$  と所定のスライスレベルとの交点をそれぞれ求め、その求められた交点の Y 座標から空間像  $DM_2' \sim DM_5'$  のそれぞれについて各ラインのライン幅を求め、このライン幅に基づいてそれぞれの線幅異常値を (4) 式に基づいて算出し、この算出結果に基づいて投影光学系 P L のコマ収差を求める。



コマ収差は、レンズの種々の輪帯で倍率が異なることによるレンズの収差であり、投影光学系 PL のイメージフィールド内の主軸から離れた部分に生じる。従って、光軸から離れた位置では、L/S パターンの空間像の内、各ラインパターンの線幅はコマ収差に応じて異なることになる。従って、スライス法を用いてエッジ検出の手法により各ラインパターンの線幅異常値を検出する上記方法によると、コマ収差を精度良く、かつ容易に計測することが可能となる。

なお、各計測マーク PM (又は  $DM_1 \sim DM_5$ ) が例えば 5 本のラインパターンを含む単独の L/S パターンであり、線幅異常値の計測精度が不十分である場合には、各計測マーク PM (又は  $DM_1 \sim DM_5$ ) として、例えば 5 本の L/S パターンが所定周期で複数組み配置された複合マークパターン、たとえば前述した応用計測マーク  $PM_2$  を、各計測マーク PM として用いても良い。図 25 には、この応用計測マーク  $PM_2$  を用いた場合に、スリット板 90 上に応用計測マーク  $PM_2$  の空間像  $PM_2'$  が形成された様子が示されている。

この空間像  $PM_2'$  は、図 26 に示されるように、2 つの基本的な周波数成分、すなわち光電変換信号の各ラインパターンのピッチに対応する例えば  $0.4 \mu m$  ピッチの周波数成分 (第 1 基本周波数成分)  $f_1$  と、各 L/S パターンの全体の幅に対応する第 2 基本周波数成分、すなわち、各 L/S パターンの繰り返し周期 (5 本のマークからなるマークグループの配置ピッチ) である例えば  $3.6 \mu m$  ピッチに対応する周波数成分  $f_2$  とを有する。

従って、主制御装置 20 では、前述した倍率・ディストーション計測の際と同様の手順で、空間像計測を行って、計測マーク  $PM_2$  の空間像  $PM_2'$  に対応する光強度信号を得た場合に、各光強度信号の第 1 基本周波数成分と、第 2 基本周波数成分との位相差を位相検出の手法により算出し、該算出結果に基づいて投影光学系 PL のコマ収差を求めることとしても良い。

空間像計測の対象となるパターンの走査方向の幅が狭いほど、コマ収差の影響を大きく受けるので、L/S パターンの各ラインパターンの空間像に対する

コマ収差の影響と、L/Sパターンの全体を1つのパターンと見た場合のそのパターンの空間像に対するコマ収差の影響とは相違する。従って、光電変換信号の各ラインパターンのピッチに対応する第1基本周波数成分と、L/Sパターンの全体の幅に対応する第2基本周波数成分との位相差を算出し、該算出結果に基づいて投影光学系のコマ収差を求める上記方法によると、位相検出の手法により、投影光学系PLのコマ収差を精度良く求めることができる。なお、この場合マークの配置ピッチ（上の例では $0.4\ \mu\text{m}$ ）と5本のマークからなるマークグループの配置ピッチ（上の例では $3.6\ \mu\text{m}$ ）の比率は整数倍とすることが信号処理上からは望ましい。

#### （第2の方法）

次に、コマ収差の第2の測定方法について説明する。この方法では、計測マークPMとしては、レチクルマーク板RFM上の前述したLine in Box マークPM<sub>22</sub>が用いられる。このマークPM<sub>22</sub>は、図27に示されるように、1辺がD1（例えば $D1 = 120\ \mu\text{m}$ ）の正方形パターンの内部に、同心でかつ1辺がD2（例えば $D2 = 80\ \mu\text{m}$ ）の正方形のスペースパターン（幅D3）が形成されたマークである。このマークPM<sub>22</sub>をウエハ上に焼き付け、現像すると、 $30\ \mu\text{m}$ 角のレジスト残しマークの中心に $20\ \mu\text{m}$ 角の細溝が同時に形成される。細溝は $(\lambda/N, A.) / 2$ 以下程度の太さとすることが望ましく、従ってD3は、その4倍以下程度とすることが望ましい。例えば、D3は、 $0.4\ \mu\text{m}$ とされる。

このLine in Box マークPM<sub>22</sub>を、コマ収差のある投影光学系で結像すると細線の方が太線よりも横ずれが大きく発生するため、細溝が偏心して対称性が崩れる。従って、その細溝の偏心量、すなわち対称性の崩れかたの程度を計測することにより、コマ収差の影響を知ることができる。

そこで、主制御装置20では、前述した倍率・ディストーション計測の際と同様の手順で、投影光学系PLの有効視野内の複数の検出点に配置された各マ

ーク  $PM_{22}$  の空間像計測を行って、それぞれに対応する光強度信号を得る。そして、各光強度信号と所定のスライスレベルとの交点に基づいて各マーク  $PM_{22}$  の空間像の対称性のずれを算出し、該算出結果に基づいて投影光学系  $PL$  のコマ収差を求める。

このようにスライス法を用いたエッジ検出の手法により、計測マーク  $PM_{22}$  の空間像の対称性のずれを算出し、その算出結果に基づいて投影光学系  $PL$  のコマ収差を求める上記方法によると、投影光学系  $PL$  のコマ収差を精度良く求めることができる。

上記の場合において、スリット板 90 上のスリット 22 a、22 b の配置上、非計測方向のスリットが空間像と干渉する場合も考えられる。このような場合、上記マーク  $PM_{22}$  に代えて、例えば線幅  $4\ \mu\text{m}$  程度の太いラインパターンと、例えば線幅  $0.4 \sim 0.6\ \mu\text{m}$  程度の細いラインパターンが計測方向に所定間隔（例えば、 $40\ \mu\text{m}$  程度）で並んだ左右（又は上下）対称の 1 次元マーク、例えば前述したマーク  $PM_6$ （又は  $PM_5$ ）などを計測マーク  $PM$  として用いても良い。

図 28 には、このような計測マーク  $PM_6$  の空間像  $PM_6'$  がスリット板 90 上に形成された状態が示されている。この図 28 において、 $D4$  は  $10\ \mu\text{m}$ 、 $D5$  は  $0.1 \sim 0.15\ \mu\text{m}$  である。このような空間像  $PM_6'$  に対応する光強度信号を、スライス法によるエッジ検出の方法により検出することにより、投影光学系  $PL$  のコマ収差を検出しても良い。

走査方向（計測方向）の幅が細いラインパターンの空間像ほどコマ収差の影響により大きく位置ずれする結果、計測マーク（ $PM_6$ ）のように、走査方向に対応する方向に所定間隔で配置された線幅の異なる複数種類のラインパターンを有する対称マークパターンの空間像は、コマ収差が大きいほどその対称性が大きくずれる。

そのため、上記の空間像  $PM_6'$  の対称性のずれを検出する方法によると、

投影光学系 PL のコマ収差を精度良く検出することができる。

勿論、この場合も、計測再現性を向上するため、図 29 のような繰り返し配置された計測マークの空間像  $HM'$  を検出することとしても良い。

一方、レチクルを用いる場合には、図 30 に示されるように、パターン領域 PA 内の中心及び 4 角の部分の合計 5 箇所計測マーク  $FM_1 \sim FM_5$  が形成された計測用レチクル R5 が用いられる。計測マーク  $FM_n$  ( $n = 1, 2, \dots, 5$ ) としては、上記マーク  $PM_{22}$  と同様の Line in Box マークが用いられる。

そこで、主制御装置 20 では、前述した倍率・ディストーション計測の際と同様の手順で、レチクルアライメント、及び空間像計測を行って、計測マーク  $FM_2 \sim FM_5$  の空間像 ( $FM_2' \sim FM_5'$  とする) に対応する光強度信号  $m(y)$  を得る。

そして、各光強度信号と所定のスライスレベルとの交点に基づいて計測マークの空間像  $FM_2' \sim FM_5'$  の対称性のずれを算出し、該算出結果に基づいて投影光学系 PL のコマ収差を求める。

次に、照明テレセン（投影光学系 PL のテレセントリシティ）の測定方法について説明する。

照明テレセンは、像位置がデフォーカスによって変化する変化量を測定して決定する。計測マークとしては、倍率、ディストーション測定と同様にコマ収差の影響を受けない大きな計測マークが用いられる。焼きけ法による場合は、Box in Box Mark あるいは大 L/S マークが用いられ、ベストフォーカス位置、 $+1 \mu m$  程度のデフォーカス位置、 $-1 \mu m$  程度のデフォーカス位置の 3 点で、それぞれ露光を行い、像位置とフォーカス位置の関係を計測し、照明テレセン（＝（像の横ずれ量／デフォーカス量））を計算することが行われる。空間像計測の場合は、焼き付けと同様にコマ収差の影響を受けない大きな計測マークを用い、空間像の絶対位置（結像位置）を各フォーカス位置で計測し、照

明テレセンを計算する。

これを更に詳述すると、投影光学系P Lの有効視野内の第1の検出点に計測マークを位置させてその計測マークの空間像を形成し、投影光学系P Lの光軸方向（Z軸方向）に関する第1位置でスリットスキャン方式で、計測マークP Mの空間像を計測する。すなわち、空間像に対してスリット22を相対的に走査してスリット22を介した光を光センサ24で光電変換して空間像に対応する光強度分布を計測する。次いで、投影光学系P Lの有効視野内の第2の検出点に計測マークP Mを位置させて、その計測マークの空間像を形成し、Z軸方向の第2位置で計測マークP Mの空間像をスリットスキャン方式で計測する。そして、スリット22（スリット板90）がZ軸方向の第1位置にあるときの空間像の計測結果から得られる空間像のXY面内の結像位置と、スリット22（スリット板90）がZ軸方向の第2位置にあるときの空間像の計測結果から得られる空間像のXY面内の結像位置と相対位置関係を求め、該相対位置関係から投影光学系P Lのテレセントリシティを算出する。

この場合、投影光学系P Lの有効視野内の第1の検出点に位置させた計測マークの空間像をZ軸方向の第1位置に対応する面内で計測した計測結果から得られる空間像のXY面内の結像位置（第1の結像位置）と、投影光学系P Lの有効視野内の第2の検出点に位置させた計測マークの空間像をZ軸方向の第2位置に対応する面内で計測した計測結果から得られる空間像のXY面内の結像位置（第2の結像位置）との相対位置関係、すなわち第1の結像位置と第2の結像位置との相対距離、及びZ軸方向の第1位置と第2位置との距離に基づいて、投影光学系P Lのテレセントリシティを算出する。このため、例えば第1の結像位置、第2の結像位置の計測に際し、ウエハ干渉計31にドリフト等が生じていても第1の結像位置、第2の結像位置の計測結果には同等の誤差が含まれる結果、干渉計ドリフトなどに起因する計測誤差の影響の殆どないテレセントリシティの高精度な計測が可能となる。

この場合において、投影光学系 P L の有効視野内の 3 点以上の検出点に位置する計測マークの空間像をスリット板 90 の Z 位置を変更しながらその計測マークの空間像をスリットスキャン方式で計測し、空間像の絶対位置（結像位置）を各フォーカス位置について計測する場合には、該複数のフォーカス位置の内の任意のフォーカス位置を基準フォーカス位置とし、基準フォーカス位置における計測マークの空間像の X Y 面内の位置と基準フォーカス位置以外での計測マークの空間像の X Y 面内での位置との相対位置を計測し、その相対位置関係に基づいて投影光学系 P L の照明テレセンを計測することとすれば良い。

この場合において、例えば、基準フォーカス位置をベストフォーカス位置の近傍に設定した場合には、その +Z 側、-Z 側のそれぞれで少なくとも各 1 点の Z 位置で投影光学系 P L の有効視野内の複数の検出点に配置された計測マークの空間像の X Y 面内位置を計測することとしても良い。

なお、照明テレセンの計測に際しては、レチクルマーク板 R F M（又はレチクル）上の単一の計測マークを用い、該マークを投影光学系 P L の有効視野内の複数の検出点に順次位置決めし、各検出点で計測マークの結像位置をスリット板 90 の Z 位置を変更して、順次計測しても良いし、投影光学系 P L の有効視野内の複数の検出点に同時に位置決めされるレチクルマーク板 R F M（又はレチクル）上における複数の計測マークの結像位置をスリット板 90 の Z 位置を変更して、順次計測しても良い。

以上詳細に説明したように、本第 1 の実施形態の露光装置 100 によると、スリット幅  $2D = n \cdot (\lambda / N \cdot A.)$ 、 $n \leq 0.8$  であるスリット板 90 を有する空間像計測器 59 を備えていることから、この空間像計測器を用いてレチクルあるいはレチクルフィデューシャルマーク板上の計測マークの空間像計測を行うことにより、空間像→空間像強度信号の変換の際に像プロファイルの劣化の少ない高精度な空間像計測が可能となる。この場合、光センサ 24（光電変換素子）以降の信号処理系には大きなダイナミックレンジが不要となる。

また、露光装置 100 によると、レチクルステージ RST によって、照明光 IL によって照明可能な投影光学系 PL の物体側焦点面位置近傍にレチクルマーク板 RFM に形成された各種自己計測に用いられる複数種類の計測マーク  $PM_1 \sim PM_{22}$  等のいずれをも位置させることができる。このため、照明光 IL を計測マーク  $PM_1 \sim PM_{22}$  に照射し、それらの計測マーク  $PM_1 \sim PM_{22}$  等の像を投影光学系 PL の像側焦点面近傍に結像させ、その像を検出することにより、専用の計測用原版を別に用意することなく、各種自己計測が可能となる。

具体的には、主制御装置 20 では、例えば照明光 IL によって、レチクルマーク板 RFM の少なくとも一部が照明され、投影光学系 PL によってその像側焦点面近傍に照明光 IL で照明された計測マークの空間像が形成された際に、該空間像とスリット 22 とが相対走査されるようにスリット板 90、すなわちウエハステージ WST を駆動する、スリットスキャン方式の空間像計測により、前述した投影光学系 PL のベストフォーカス位置、像面形状（像面湾曲を含む）、球面収差、ディストーション、倍率、コマ収差、照明テレセン等の光学特性、及びアライメント系 ALG1 のベースライン計測などの自己計測を行うことが可能となっている。これより明らかなように、本実施形態では、主制御装置 20 によって駆動装置が構成されている。

このように、本実施形態では、デバイス製造用のレチクルと計測用原版との交換作業を行うことなく、投影光学系 PL の光学特性を空間像計測により計測することが可能となる。従って、装置のダウンタイムの短縮化により、最終製品であるデバイスの生産性を向上させることが可能となる。

また、露光装置 100 では、主制御装置 20 が、空間像計測器 59 を用いて前述のスリットスキャン方式による空間像の計測、及びこの計測結果を用いての前述したような投影光学系 PL の種々の光学特性、例えば像面湾曲、ディストーション、倍率、コマ収差などの各種収差の計測を、高精度に行うことができる。そのため、例えば露光装置の製造段階における工場内での露光装置の立

ち上げ時などに、前述したような投影光学系 P L の種々の光学特性の計測を行い、この計測結果に基づいて投影光学系 P L の光学特性の調整を行うこととしても良い。なお、露光装置の製造方法については、更に後述する。

例えば、主制御装置 20 では、ベストフォーカス位置、像面形状の計測結果に基づいて、多点焦点位置検出系 (60a, 60b) を構成する各フォーカスセンサ (受光素子) の検出出力のオフセット設定、あるいは原点位置の再設定等のキャリブレーションを高精度に行うことができる。

また、主制御装置 20 では、ディストーション、倍率、コマ収差、像面湾曲などの諸収差については、定期的に上記の計測を行い、この計測結果に基づいて、投影光学系 P L の不図示の結像特性補正装置 (例えば、投影光学系を構成する特定のレンズエレメントを光軸方向及び光軸に直交する面に対して傾斜方向に駆動する装置、あるいは投影光学系を構成する特定のレンズエレメント間に設けられた気密室の内圧を調整する装置など) により、投影光学系の上記各種収差を補正する収差の自動調整が可能となる。なお、上記の結像特性補正装置による倍率の調整は、特に走査露光時の非走査方向の倍率について行われる。走査露光時の走査方向の倍率の補正は、例えば、走査露光時のレチクルとウエハの少なくとも一方の走査速度を調整することにより行われる。

また、主制御装置 20 では、上記の照明テレセンの計測結果に基づいて、照明系 10 内の不図示のリレーレンズを駆動することにより照明テレセンを自動修正することも可能である。

このように、露光装置 100 では、例えば投影光学系の光学特性 (結像特性を含む) の初期調整、あるいは、露光開始に先立って投影光学系の光学特性の調整により、高精度に光学特性が調整された投影光学系 P L を用いて、露光が行われるので、結果的に露光精度の向上が可能となる。

また、露光装置 100 では、主制御装置 20 により、空間像計測器 59 を用いて、マーク検出系としてのアライメント系 A L G 1 のベースライン量の検出



が精度良く行われるので、そのベースライン量を用いて、露光時等にウエハWの位置を制御することにより、レチクルとウエハとの重ね合せ精度の向上が可能であり、この点においても露光精度の向上が可能となっている。

本実施形態の露光装置100によると、上述したベースライン計測によりベースラインが自動補正されたアライメント系ALG1を用いて精度良く、ウエハアライメント(EGA)等が行われ、また、走査露光時には、キャリブレーションが高精度に行われた多点焦点位置検出系(60a, 60b)を用いて、ウエハWのオートフォーカス、オートレベリングを高精度に行ってウエハW表面を計測された像面に実質的に合致させつつ、諸収差が高精度に調整された投影光学系PLを介してレチクルRの回路パターンがウエハW上の各ショット領域に重ね合せて転写されるので、露光精度(重ね合わせ精度、フォーカス合わせ精度を含む)を高く維持した露光が可能となる。

本実施形態において、主制御装置20では、空間像計測に際して、ウエハステージWST(スリット板90)を静止させたまま、レチクルステージRST(レチクルマーク板RFM)を移動させても良く、あるいはウエハステージWST(スリット板90)及びレチクルステージRSTを同時に相互に逆向きに移動させても良い。

なお、投影光学系PLの倍率誤差は、レチクルRの回路パターンとウエハW上のショット領域との重ね合せ精度に影響を与えるため、投影光学系PLの倍率計測及びその結果に基づく自動補正は、なるべく高頻度で行うことが望ましい。しかし、上述したスリットスキャン方式による空間像計測は、計測にある程度の時間を要するので、頻繁に行うことはスループットの低下の要因となる。

そこで、主制御装置20は、ウエハWをロット単位で露光する際に、各ロット先頭のウエハWの露光時には、レチクルマーク板RFM、空間像計測器59を用いてレチクルマーク板RFM上の計測マークの空間像計測を行い、その計

測結果に基づいて投影光学系P Lの倍率を算出し、各ロット内の先頭以外のウエハの露光時には、レチクルマーク板R F M及びレチクルRの一方のアライメントマークと、ウエハステージW S T上の不図示の基準マークの投影光学系P Lを介した像とをR A顕微鏡2 8を用いて観察し、その観察結果に基づいて投影光学系P Lの倍率を算出することとしている。これにより、スループットを不用意に低下させることなく、投影光学系P Lの倍率を所望の値に維持し、ひいては重ね合せ精度を高く維持することができる。

また、本実施形態では露光装置1 0 0を構成する照明系1 0を用いて、空間像計測を行うので、各種照明条件（コンベンショナル照明、輪帯照明、変形照明など）、レチクル種類（ハーフトーンレチクル、通常レチクル）などとの組み合わせでの空間像計測が可能である。従って、露光時と同じ若しくはそれに近い条件下での各種自己計測をレチクルマーク板R F Mを用いて行うことが可能である。

これらのレチクル種類、対象線幅、孤立線、密集線などの別、照明条件などのいろいろな組み合わせは同一の露光装置内であっても相互に異なるプロセスプログラムで管理される。従って、例えばフォーカスキャリブレーションにおいて必須となる、計測値と最適条件とのオフセット値もこれらの組み合わせに対応可能なだけ用意しておくことが望ましい。

通常、投影光学系P Lの収差などの調整は、異なる照明条件毎に行われるが、その際に使われるマークは孤立線、密集線の特定の線幅になる。従って、照明条件が決まれば空間像計測に用いられる計測マークも決まると考えて差し支えなく、複数のプロセスプログラムに対応するオフセットの総数は照明条件の総数と等しくなる。本実施形態のレチクルマーク板R F Mでは、空間像計測に主として用いられる各ネガマークに近接して焼き付けに主として用いられるポジマークが配置されている（図8参照）。従って、このレチクルマーク板R F M上のポジマークを用いた焼き付け法により、投影光学系P Lの光学特性を計

測し、この計測結果に基づいて、投影光学系PLの調整を行った直後にレチクルマーク板RFM上のネガマークの空間像計測を行い、その結果に基づいて上記のオフセットを容易に求めることが可能である。

このほかに、デバイス製造用のレチクルとレチクルマーク板RFMとの形状の差異（撓み量等の差異）に伴う誤差もオフセットとして管理する必要がある。これは、デバイス製造用のレチクル上のマークとレチクルマーク板RFM上のマークとの空間像の計測結果を比較することで容易に求められる。この意味では、デバイス製造用のレチクルに上述したRFMと同一種類の各種計測マークを形成することが望ましい。

なお、上記実施形態では、スリット幅2Dが、照明光の波長 $\lambda$ と投影光学系PLの開口数N.A.との両者を考慮して決定されている場合について説明したが、本発明がこれに限定されるものではない。

すなわち、スリット幅2Dを、波長 $\lambda$ 、開口数N.A.のいずれか一方のみを考慮して定めても良い。このようなスリット幅2Dのスリットを有するスリット板を備えた空間像計測器を用いても、上記実施形態と同様に、スリットスキャン方式により、所定パターンの空間像（像強度の分布）の精度の高い計測が可能である。

次に、スリット幅（2D）の決定に関して更に説明する。ここでは、一例として、フォーカス計測の場合を採り上げて好適なスリット幅の決定方法に関して説明する。

前述の如く、投影光学系のベストフォーカス位置の計測は、スリット板90のZ軸方向（光軸方向）の位置を変化させつつ、計測マークの空間像計測をスリットスキャン方式により複数回繰返し、これにより得られた光強度信号の（1次／0次）の振幅比であるコントラスト（あるいはその他の評価量）が最大（あるいはピーク）となるスリット板90のZ位置（コントラストピークのZ座標）を検出することにより求める。

通常、ベストフォーカスの検出に際しては、スリット板 90 を、 $0.15 \mu\text{m}$  のピッチ間隔で、15 段階（ステップ）程度変化させる。

ここで、図 3 1 を用いて上記のベストフォーカス検出の一例について説明する。この図 3 1 は、スリット板 90 を 13 段階（ステップ）で Z 軸方向に変化させ、各点で得られた 13 点のコントラストの計測値（図 3 1 中の×印）を横軸を Z 軸として示すものである。図 3 1 中に×印で示される 13 点のコントラストの計測値に基づいて、4 次程度の近似曲線 C を最小二乗法によって求める。この近似曲線 C と、適当な閾値（スレッシュホールドレベル） $S_L$  との交点を求め、交点間の距離 =  $2B$  の中点をベストフォーカスに対応する Z 座標値とする。

図 3 2 には、図 3 1 と同様の線図が示されている。但し、この図 3 2 では縦軸は、1 次周波数成分（以下、適宜「1 次成分」と略述する）の振幅（又は後述するファースト・オーダー）を示す。ここで、図 3 2 における  $WZ$ （＝ステップピッチ×データ数）の範囲を固定にした時のフォーカス検出精度を考える。

#### (1) ショットノイズが支配的な場合

1 次成分の振幅を  $S$  とすると、ショットノイズは  $S^{1/2}$  に比例する。1 次成分の振幅の  $Z$  に関する曲線の平均傾きは焦点深度（DOF）に反比例するので、各 1 次成分の振幅のノイズがデータの  $Z$  方向へ及ぼす揺らぎをノイズ  $N$  とすれば、

$$N \propto S^{1/2} \cdot \text{DOF} \propto \lambda \cdot S^{1/2} / (N.A.)^2 \quad \dots\dots (5)$$

の関係がある。ここで、 $N.A.$  は、投影光学系の開口数である。

しかるに、対象パターンの線幅を  $P$  とすると、 $P \propto \lambda / N.A.$  の関係があるので、次の (6) 式の関係が成り立つ。

$$S/N \propto (N.A.)^2 \cdot S^{1/2} / \lambda \propto \lambda \cdot S^{1/2} / P \quad \dots\dots (6)$$

ここで、 $S/N$  は、一次成分の振幅とノイズ振幅との比である  $S/N$  比であ

る。

(2) ダーク・ノイズが支配的な場合

ダーク・ノイズは1次成分の振幅 $S$ に依存しない。1次成分の振幅の $Z$ に関する曲線の平均傾きはDOFに反比例するので、各1次成分の振幅のノイズがデータの $Z$ 方向へ及ぼす揺らぎをノイズ $N$ とすれば、

$$N \propto \text{DOF} \propto \lambda / (N.A.)^2 \quad \dots\dots (7)$$

の関係がある。

従って、対象パターンの線幅を $P$ として、

$$S/N \propto (N.A.)^2 \cdot S/\lambda \propto \lambda \cdot S/P \quad \dots\dots (8)$$

の関係がある。

(6)、(8)式よりスリット幅(2D)を最適にする際には、波長と対象パターンのピッチが決定していれば、1次成分の振幅 $S$ のみに着目すれば良く、 $S/N$ 比は、ノイズの性質によって1次振幅 $S$ の0.5～1乗に比例することがわかる。

図33A～図36Bには、スリット幅(2D)の好ましい範囲を求めるためのシミュレーション結果の一例が示されている。このうち、図33A、図34A、図35A及び図36Aは、 $N.A. = 0.68$ 、 $\lambda = 248 \text{ nm}$ 、 $\sigma = 0.85$ の条件の場合を示す。また、図33B、図34B、図35B及び図36Bは、 $N.A. = 0.85$ 、 $\lambda = 193 \text{ nm}$ 、 $\sigma = 0.85$ の条件の場合を示す。

図33A、図33Bは、フォト・マルチプライヤ・チューブを用いた例を想定して(6)式を適用した場合のフォーカス検出に関する $S/N$ 比を示す。図33Aにおいて、実線(●)、破線(■)、点線(▲)は、計測マークとして、ライン幅 $L$ がそれぞれ200 nm、220 nm、250 nmで、デューティ比がいずれも50%の $L/S$ パターンを用いた場合を、それぞれ示す。図33Bにおいて、実線(●)、破線(■)、点線(▲)は、計測マークとして、ライン

幅 $L$ がそれぞれ120 nm、130 nm、140 nmで、デューティ比がいずれも50%の $L/S$ パターンを用いた場合を、それぞれ示す。

図34 A、図34 Bは、図33 A、図33 Bにそれぞれ対応するコントラストを示す。コントラストは、スリット幅が小さいほど大きくなる。0次の振幅はスリット幅に比例するので、コントラストに0.3  $\mu$ mを基準としたスリット幅の比率を乗じたものがファースト・オーダー（1st Order）である。これは1次成分の振幅に比例する。

図35 A、図35 Bには、図33 A、図33 Bにそれぞれ対応するファースト・オーダーが、示されている。

図33 A、図33 Bから、結果的にいずれの波長、線幅の場合でも、フォーカス検出に最適なスリット幅（2D）は、パターンピッチ（ $=2L$ ）の半分と同じ長さが最適であることが判明した。ピッチに関しては小さい程良いが、勿論解像限界以内であることが必須である。従って、スリット幅の最適値は露光装置の解像限界ピッチの半分程度となる。

図36 A、図36 Bは、図33 A、図33 Bと同一条件で、（8）式を適用した場合のフォーカス検出に関する $S/N$ 比を示す。

ここで、スリット幅2Dの最適化について、更に別の観点から説明する。

空間像計測器のスリットの幅2D、空間像の強度分布を $i(y)$ とするとスリット透過強度 $m(y)$ は、前述した（1）式を一般化した次の（9）式で表される。

$$m(y) = \int_{y-D}^{y+D} i(t) dt \quad \dots(9)$$

フォーカス検出は解像限界の $L/S$ の強度像の0次、1次の比（コントラスト）より計算する。空間像の強度像に含まれる0次成分の強度を $a$ 、1次成分の強度を $b \cdot \sin(\omega_1 \cdot y)$ とすれば、観測されるスリット透過光強度 $m_0(y)$ 、 $m_1(y)$ は次の（10）、（11）式のようなになる。但し、 $\omega_1$ は、解像限界の空間周波数である。

$$m_0(y) = a \int_{y-D}^{y+D} dt = 2aD \quad \dots(10)$$

$$m_1(y) = b \int_{y-D}^{y+D} \sin(\omega_1 t) dt = \frac{2b}{\omega_1} \sin(\omega_1 y) \cdot \sin(\omega_1 D) \quad \dots(11)$$

(10) 式より、0次成分はスリット幅に単純に比例し、(11) 式より1次成分は、次の(12) 式の条件を満足するときに最大になる。

$$\omega_1 D = \pi / 2 \cdot (2n - 1) \quad \dots\dots (12)$$

(但し、 $n = 1, 2, 3, \dots$ )

(12) 式を満足するとき、 $D = \pi / (2\omega_1)$  の奇数倍のときに、1次成分のゲインが最大となる(コントラストが最大となる)ので、スリット幅 $2D$ が $\pi / \omega_1$ の奇数倍となるときの、すなわち最小マークピッチの半分(以下、適宜「最小ハーフピッチ」と呼ぶ)の奇数倍であることが望ましい。

また、1次成分のゲインが高く、0次成分のゲインが低いほど電気系のダイナミックレンジは楽になるので、結局、(12) 式で $n = 1$ の場合、すなわちスリット幅 $2D$ が $\pi / \omega_1$ の場合、換言すれば最小ハーフピッチと一致する場合が最良である。

図37A、図37Bには、スリット幅 $2D$ が最小ハーフピッチの1倍のとき、3倍のときの、シミュレーションデータが、それぞれ示されている。これらの図において、実線の曲線LL1はスリット透過光の強度信号を示し、一点鎖線LL2はその微分信号を示し、破線LL3は空間像強度を示す。これらの図において、横軸はスリット位置であり、縦軸は信号強度である。

図38A、図38Bには、スリット幅 $2D$ が最小ハーフピッチの5倍のとき、7倍のときの、シミュレーションデータが、それぞれ示されている。これらの図において、実線の曲線LL1はスリット透過光の強度信号を示し、一点鎖線LL2はその微分信号を示し、破線LL3は空間像強度を示す。これらの図において、横軸はスリット位置であり、縦軸は信号強度である。

図37A、図37B及び図38A、図38Bにおいて微分信号LL1の振幅

は、同一振幅となっていることがわかる。但し、スリット幅  $2D = \text{最小ハーフピッチ} \times n$  の  $n$  が 1、3、5、7 と大きくなるに従って、信号処理系（光センサ以降の処理系）により大きなダイナミックレンジが必要となることがわかる。これより、スリット幅  $2D$  が最小ハーフピッチに一致する場合が最良であることがわかる。

また、前述した (1)、(2) 式をフーリエ変換すると、スリットによる平均化効果の周波数特性が判明する。

$$p(u) = \int_{-\infty}^{\infty} p(y) \cdot \exp(-2\pi i u y) dy = 2D \frac{\sin(2\pi u D)}{2\pi u D} = 2D \frac{\sin(\omega D)}{\omega D} \quad \dots(13)$$

図 39 には、解像限界の空間周波数を  $\omega_1$  として、スリット幅  $2D$  が解像限界のハーフピッチの 1、3、5 倍の時の周波数特性が示されている。この図 39 において、符号 GF5、GF3、GF1 は、それぞれ、スリット幅が最小ハーフピッチの 5 倍、3 倍、1 倍の場合の周波数特性線図を示す。この図 39 から明らかなように、ゲイン（利得）の安定性の面でも、スリット幅が最小ハーフピッチに一致する場合（GF1）が、最良であることがわかる。

### 《第 2 の実施形態》

次に、本発明の第 2 の実施形態について図 40 及び図 41 に基づいて説明する。ここで、前述した第 1 の実施形態に係る露光装置 100 と同一若しくは同等の構成部分については、同一の符号を用いるとともに、その説明を簡略化し若しくは省略するものとする。

図 40 には、この第 2 の実施形態に係る露光装置の構成が一部省略されて示されている。この露光装置 110 は、マーク検出系としてのアライメント系 ALG2 の構成のみが、露光装置 100 と相違する。そこで、以下においては、この相違点を中心として説明する。

このアライメント系 ALG2 は、図 40 に示されるように、投影光学系 PL の側面に設けられたオフアクシス方式のレーザ・スキャン式アライメントセンサである。



このアライメント系ALG2は、図40に示されるように、アライメント用光源132、ハーフミラー134、第1対物レンズ136、第2対物レンズ138、シリコン・フォトダイオード（SPD）140等を含んで構成されている。ここで、光源132としては、ヘリウム・ネオンレーザが用いられる。このアライメント系ALG2では、図40に示されるように、光源132からレーザビームが、ハーフミラー134、第1対物レンズ136を介してウエハW上のアライメントマークMwを照明するためのレーザビームスポットを形成する。レーザビームは通常固定されており、ウエハステージWSTを走査（スキャン）することによってレーザビームとアライメントマークMwとを相対走査する。

アライメントマークMwから発生する散乱光は第1対物レンズ136、ハーフミラー134、及び第2対物レンズ138を介してシリコン・フォトダイオードSPD140上に集光されて受光される。アライメント系ALG2には、0次光フィルタが挿入されて暗視野になっており、アライメントマークMwの存在する位置だけで散乱光が検出される。そして、SPD140が受光した光の光電変換信号がSPD140から主制御装置20に供給される。主制御装置20では、この光電変換信号と、そのときのウエハ干渉計31の出力であるウエハステージWSTの位置情報とに基づいて、干渉計光軸で規定されるステージ座標系におけるアライメントマークMwの座標位置を算出するようになっている。

このようなステージスキャン・タイプのレーザ・スキャン式アライメントセンサのベースラインの安定性は、レーザのビーム位置の安定性と干渉計の安定性、及びSPD～電気系のゲインの安定性によって決定する。

ここで、このアライメント系ALG2のベースラインの計測について説明する。前提として、レチクルRがレチクルステージRST上に搭載されているものとする。

まず、主制御装置 20 では、前述と同様に、レチクル R 上に形成されたレチクルアライメントマーク（図示省略）の投影像を、空間像計測器 59 を用いて計測し、レチクルパターン像の投影位置を求める。すなわち、レチクルアライメントを行う。

次に、主制御装置 20 では、ウエハステージ WST を移動して、図 4 1 に示されるように、レーザビームスポットに対して空間像計測器 59 のスリット 22 を走査し、レーザ光の透過光の強度信号と同時にウエハ干渉計 31 の計測値を取り込み、レーザビームプロファイルを得、それに基づいてビームスポットの位置を求める。これにより、レチクル R のパターン像の投影位置とアライメント系 ALG 2 のレーザスポット照射位置との相対位置、すなわちアライメント系 ALG 2 のベースライン量を求める。

以上説明した本第 2 の実施形態に係る露光装置 110 によると、前述した第 1 の実施形態の露光装置 100 と、同等の効果を得ることができる。また、この場合も、主制御装置 20 により空間像計測器 59 を用いて、アライメント系 ALG 2 のベースライン量が検出されるが、このベースライン量の検出に当たり、レチクルパターン像の投影位置及びアライメント系 ALG 2 の位置を、空間像計測器 59 により直接的に計測することができるので、精度の高いベースライン量の計測が可能である。

なお、空間像計測器 59 のスリット板 90 上のスリットの配置は、前述したものに限らず、例えば図 4 2 A に示されるように、前述したスリット 22 a、22 b の組に加え、X 軸に対して  $45^\circ$ 、 $135^\circ$  を成す方向にそれぞれ伸びるスリット 22 c、22 d の組を加えても良い。勿論、これらのスリット 22 c、22 d の長手方向に垂直な方向のスリット幅 2D は、スリット 22 a、22 b と同様の基準により同様の寸法に定められる。

この場合、図 4 2 A に示されるように、矢印 C 方向に空間像計測器 59（ウエハステージ WST）を走査しつつ、例えば図 4 2 A に示される空間像 PM'

に対してスリット 22 d を走査することにより、その空間像に対応する光強度信号を精度良く検出することができる。また、図 4 2 B に示されるように、矢印 D 方向に空間像計測器 5 9 (ウエハステージ W S T) を走査しつつ、例えば図 4 2 B に示される空間像 P M' に対してスリット 22 c を走査することにより、その空間像に対応する光強度信号を精度良く検出することができる。

なお、上記の 2 組のスリット (22 a, 22 b)、(22 c, 22 d) をスリット板 9 0 上に設ける場合、それら各組のスリットはある程度離れた位置に配置されるため、ウエハステージ W S T 内部の受光光学系及び光センサの構成として、各組のスリットを光学的あるいは電氣的な選択機構によって選択できる構成を採用しても良い。具体的には、シャッタで光路が切り替え可能な受光光学系と単一の光電変換素子とを組み合わせても良いし、受光光学系及び光電変換素子を各組のスリットに対してそれぞれ設けても良い。

次に、像回復について説明する。

前述した (1)、(2) 式より、スリットスキャンによる平均化は、空間周波数的には  $p(y)$  のフーリエ変換によりどのようなスペクトルかが判明する。これは一般に装置関数  $P(u)$  と呼ばれている。装置関数は前述した (13) 式で示される。

(13) 式の周波数特性の逆特性のフィルタ  $P_{inv}(u)$  は次の (14) 式で示され、これを観測される空間像の強度信号  $m(y)$  のフーリエスペクトルに乗じてから逆フーリエ変換を行えば像回復が行われる。

$$P_{inv}(u) = 1/P(u) \quad \dots (14)$$

インコヒーレント結像の光学的伝達関数 (O T F) の上限が  $2 N \cdot A \cdot \lambda$  であるから完全な像回復のためには次の (15) 式を満たす必要がある。

$$D < \frac{\lambda}{4 N \cdot A} \quad \dots (15)$$

以上のような像回復の手法を用いれば、非常に細い孤立線の像プロフィールも回復できる。孤立線は様々な周波数成分を含んでおり、孤立線の空間像を複

数のフォーカスで計測し、これらを用いてレンズの波面収差を計測することも考えられる。

また、繰り返しパターンであるL/Sマークを像回復することで、レンズの離散的な周波数成分の波面収差を測定することも考えられる。

これらの波面収差の測定に際しての空間像計測には、例えば図42Aに示される4方向についての空間像の計測が可能な空間像計測器59を用いることが望ましい。

なお、上記各実施形態では、本発明がステップ・アンド・スキャン方式の投影露光装置に適用された場合について説明したが、これに限らず、マスクと基板とを静止した状態でマスクのパターンを基板に転写するとともに、基板を順次ステップ移動させるステップ・アンド・リピート型の露光装置にも本発明は適用することができる。

また、上記各実施形態では、本発明が半導体製造用の露光装置に適用された場合について説明したが、これに限らず、例えば、角型のガラスプレートに液晶表示素子パターンを転写する液晶用の露光装置や、薄膜磁気ヘッド、撮像素子、マイクロマシン、DNAチップ、及びレチクルやマスクなどを製造するための露光装置などにも本発明は広く適用できる。

また、上記各実施形態では、露光用照明光としてKrFエキシマレーザ光（248nm）、ArFエキシマレーザ光（193nm）などを用いる場合について説明したが、これに限らず、g線（436nm）、i線（365nm）、F<sub>2</sub>レーザ光（157nm）、銅蒸気レーザ、YAGレーザの高調波等を露光用照明光として用いることができる。

また、上記各実施形態では、投影光学系として縮小系かつ屈折系を用いる場合について説明したが、これに限らず、投影光学系として等倍あるいは拡大系を用いても良いし、屈折系、反射屈折系、あるいは反射系のいずれを用いても良い。

また、ウエハステージやレチクルステージにリニアモータ（米国特許第5, 623, 853号又は米国特許第5, 528, 118号の公報参照）を用いる場合は、エアベアリングを用いたエア浮上型およびローレンツ力又はリアクタンス力を用いた磁気浮上型のどちらを用いても良い。

また、ステージは、ガイドに沿って移動するタイプでも良いし、ガイドを設けないガイドレスタイプでも良い。

ウエハステージの移動により発生する反力は、特開平8-166475号公報及びこれに対応する米国特許第5, 528, 118号などに記載されているように、フレーム部材を用いて機械的に床（大地）に逃がしても良い。上記公報及び米国特許における開示を援用して本明細書の記載の一部とする。

レチクルステージの移動により発生する反力は、特開平8-330224号公報及びこれに対応する米国特許第5, 874, 820号に記載されているように、フレーム部材を用いて機械的に床（大地）に逃がしても良い。上記公報及び米国特許における開示を援用して本明細書の記載の一部とする。

#### 《露光装置の製造方法》

次に、露光装置10の製造方法について説明する。

露光装置10の製造に際しては、まず、複数のレンズ、ミラー等の光学素子などを含む照明光学系、投影光学系PL、多数の機械部品から成るレチクルステージ系やウエハステージ系などを、それぞれユニットとして組み立てるとともに、それぞれユニット単体としての所望の性能を発揮するように、光学的な調整、機械的な調整、及び電気的な調整等を行う。

次に、照明光学系や投影光学系PLなどを露光装置本体に組むとともに、レチクルステージ系やウエハステージ系などを露光装置本体に取り付けて配線や配管を接続する。

次いで、照明光学系や投影光学系PLについては、光学的な調整を更に行う。これは、露光装置本体への組み付け前と組み付け後とでは、それらの光学系

その後、更に総合調整（電気調整、動作確認等）をする。これにより、光学特性が高精度に調整された投影光学系PLを用いて、レチクルRのパターンをウエハW上に精度良く転写することができる、上記各実施形態の露光装置を製造することができる。なお、露光装置の製造は温度およびクリーン度等が管理されたクリーンルームで行うことが望ましい。

次に上述した各実施形態の露光装置をリソグラフィ工程で使用したデバイスの製造方法の実施形態について説明する。

次に、ステップ204（ウエハ処理ステップ）において、ステップ201～

ステップ203で用意したマスクとウエハを使用して、後述するように、リソグラフィ技術等によってウエハ上に実際の回路等を形成する。次いで、ステップ205（デバイス組立てステップ）において、ステップ204で処理されたウエハを用いてデバイス組立てを行う。このステップ205には、ダイシング工程、ボンディング工程、及びパッケージング工程（チップ封入）等の工程が必要に応じて含まれる。

最後に、ステップ206（検査ステップ）において、ステップ205で作成されたデバイスの動作確認テスト、耐久テスト等の検査を行う。こうした工程を経た後にデバイスが完成し、これが出荷される。

図44には、半導体デバイスにおける、上記ステップ204の詳細なフロー例が示されている。図44において、ステップ211（酸化ステップ）においてはウエハの表面を酸化させる。ステップ212（CVDステップ）においてはウエハ表面に絶縁膜を形成する。ステップ213（電極形成ステップ）においてはウエハ上に電極を蒸着によって形成する。ステップ214（イオン打ち込みステップ）においてはウエハにイオンを打ち込む。以上のステップ211～ステップ214それぞれは、ウエハ処理の各段階の前処理工程を構成しており、各段階において必要な処理に応じて選択されて実行される。

ウエハプロセスの各段階において、上述の前処理工程が終了すると、以下のようにして後処理工程が実行される。この後処理工程では、まず、ステップ215（レジスト形成ステップ）において、ウエハに感光剤を塗布する。引き続き、ステップ216（露光ステップ）において、上で説明した露光装置（及び露光方法）によってマスクの回路パターンをウエハに転写する。次に、ステップ218（エッチングステップ）において、レジストが残存している部分以外の部分の露出部材をエッチングにより取り去る。そして、ステップ219（レジスト除去ステップ）において、エッチングが済んで不要となったレジストを取り除く。

これらの前処理工程と後処理工程とを繰り返し行うことによって、ウエハ上に多重に回路パターンが形成される。

以上説明した本実施形態のデバイス製造方法を用いれば、露光工程（ステップ216）において上記実施形態の露光装置が用いられるので、重ね合せ精度良くレチクルのパターンをウエハ上に転写することができ、デバイスの歩留まりを向上させることが可能となる。また、投影光学系の光学特性の計測に際して、レチクルマーク板RFMを用いることにより、装置の稼動効率の向上が可能となる。従って、高集積度のデバイスの生産性（歩留まりを含む）を向上させることが可能になる。

上述した本発明の実施形態は、現状における好適な実施形態であるが、リソグラフィシステムの当業者は、本発明の精神と範囲から逸脱することなく、上述した実施形態に対して、多くの付加、変形、置換をすることに容易に想到するであろう。全てのこうした付加、変形、置換は、以下に記載される請求の範囲によって最も的確に明示される本発明の範囲に含まれるものである。